



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№4'2024

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

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2024

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ  
КОЛЕГІЇ

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

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

## ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

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

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

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

Видавець: Національний університет "Запорізька політехніка", м. Запоріжжя. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №6952 від 22.10.2019р.  
Реєстрація 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. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон:+380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua. Електронна адреса журналу <http://ee.zntu.edu.ua> E-mail: etae@ukr.net

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 23.01.2025 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №6 від 28.01.2025 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,98. Тираж 300 прим. Зам. №38.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№4'2024**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2024

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

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

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

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

Founder and editor: Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia. Certificate of publisher Civil Code №6952 dated October 22, 2019.  
Registration of an entity in the field of print media: Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 3040 of November 7, 2024. Media ID: R30-05581.  
Journal was registered: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 24219-14059 PR dated November 7, 2019.  
Address of editor and editorial office: Zaporizhzhia Polytechnic National University, st. Zhukovskiy, 64, Zaporozhia, 69063, Ukraine. Phone: +380(61)769-82-96 Fax: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.  
**E-address:** <http://ee.zntu.edu.ua>; **E-mail:** [etae@ukr.net](mailto:etae@ukr.net)

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on January 23, 2025 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.6 dated January 28, 2025). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,98. Number of copies printed 300. Rep. № 38.

# ЗМІСТ

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Данильченко Д.О., Кузнецов Д.С.*

Застосування удосконаленої цільової функції для мінімізації активних втрат потужності.....7

*Волошко А. В., Бедерак Я. С., Козловський Є. В.*

Методика пошуку приєднання з дефектом обліку серед декількох приєднань на одній секції шин .....17

## III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

*Мардзявко В.А., Руденко А.Ю.*

Оптимізація енерговикористання під час маршрутизації транспортування зерна елеватора.....28

*Василенко О.В., Сніжної Г.В.*

Підходи у моделюванні систем перетворення електроенергії в гібридних транспортних засобах.....36

*Білка Д.О., Шаптала С.В., Миронова Н.О.*

Розробка прототипу цифрового двійника робототехнічного пристрою для відтворення руху в просторі.....48

# CONTENTS

## II POWER ENGINEERING

*Danylchenko D.O., Kuznetsov D.S.*

Application of an advanced objective function to minimize active power losses.....7

*Voloshko A.V., Bederak Y.S., Kozlovskiy Y.V.*

Method for identifying a connection with a metering defect among multiple connections on a single busbar section.....17

## III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

*Mardziavko V.A., Rudenko A.Y.*

Optimization of energy use during routing of transportation of grain elevator.....28

*Vasylenko O.V., Snizhnoi G.V.*

Optimization of energy use during grain transportation routing at the elevator.....36

*Bilka D.O., Shaptala S.V., Mironova N.O.*

Development of a digital twin prototype of a robotic device for motion reproduction in spac.....48

## ЗАСТОСУВАННЯ УДОСКОНАЛЕННОЇ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ АКТИВНИХ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ

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

КУЗНЕЦОВ Д.С. аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1543-7854>; e-mail: [dmytro.kuznetsov@ieec.khi.edu.ua](mailto:dmytro.kuznetsov@ieec.khi.edu.ua).

**Мета роботи.** Вдосконалення метода оптимізації активних втрат потужності в мережах із використанням динамічного управління параметрами конденсаторних установок, враховуючи змінність генерації та навантажень.

**Методи дослідження.** Аналіз електричної системи, змодельованої в MATLAB, із використанням елементів відновлювальних джерел енергетики та конденсаторних установок. Виконується дослідження оптимізації активних втрат потужності за рахунок застосування удосконаленої цільової функції, яка включає в себе багатofакторність системи та певні обмеження. Проведено порівняння активних втрат та їх змін при наявності в електричній мережі відновлювальних джерел енергетики та конденсаторних установок.

**Отримані результати.** Отримані результати моделювання демонструють практичну придатність запропонованого метода для зниження активних втрат у системі. Це, у свою чергу, веде до скорочення витрат на експлуатацію та обслуговування мереж, зменшення енергетичних втрат, а також до покращення якості енергопостачання. Зниження активних втрат сприяє підвищенню економічної ефективності енергосистеми.

Моделювання в MATLAB/Simulink надає можливість проводити аналіз для оцінки поведінки системи в різних умовах роботи, таких як пікові навантаження або різкі коливання генерації. Це дозволяє забезпечити гнучкість і адаптивність енергосистеми до реальних умов експлуатації.

Отримані результати також сприяють вирішенню завдань сталого розвитку, оскільки вони забезпечують ефективну інтеграцію ВДЕ без погіршення стабільності та параметрів мережі.

**Наукова новизна.** Запропоновано комплексне моделювання роботи енергосистеми з урахуванням динамічного управління конденсаторними установками та інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що дозволяє оцінювати ефективність різних компенсаційних заходів та їх вплив на активні втрати. Наукова новизна полягає у створенні моделі, яка враховує змінний характер навантаження, параметри ліній електропередачі та нестабільну генерацію ВДЕ, забезпечуючи комплексний підхід до оптимізації роботи енергосистеми.

**Практична цінність.** Вдосконалення цільової функції для мінімізації активних втрат потужності, шляхом додавання в функцію генерації конденсаторних установок, зміну генерацію відновлюваних джерел енергії, зміне навантаження ПС (активне та реактивне), це дозволило більш точно оцінити вплив реактивної потужності та інтеграції ВДЕ на активні втрати, підвищити ефективність управління енергосистемою за рахунок врахування реальних умов роботи системи (динаміка навантаження та генерації).

**Ключові слова:** цільова функція, відновлювальні джерела електроенергії, конденсаторні установки, моделювання, активні втрати, ефективність.

### I. ВСТУП

Компенсація реактивної потужності є ключовою стратегією для підвищення ефективності електричних мереж, включаючи системи з відновлювальними джерелами електроенергії (ВДЕ). Реактивна потужність не виконує корисну роботу, але вона необхідна для підтримки електромагнітних полів в обладнанні. Її наявність у мережі призводить до додаткових втрат енергії, зменшення пропускної здатності мережі та підвищення навантаження на обладнання [1].

Актуальність компенсації реактивної потужності полягає в:

1. Зростаючих енергетичних потребах. Сучасні економіки і суспільства залежать від стабільного та ефективного енергопостачання. Зростання споживання електроенергії у промисловості, комерції та побутовому секторі вимагає ефективного управління енергетичними ресурсами, включаючи реактивну потужність;

2. Підвищення енергоефективності. Ефективне використання енергії стає пріоритетом через обмеженість ресурсів та екологічні проблеми. Компенсація реактивної потужності дозволяє зменшити втрати електроенергії в мережах, що сприяє загальному підвищенню енергоефективності;

3. Зменшення витрат. Зменшення витрат енергії і підвищення пропускної здатності мережі дозволяє зменшити операційні витрати на передачу та розподіл електроенергії. Це також зменшує потребу в інвестиціях у нову інфраструктуру;

4. Стабілізація електричних мереж. Коливання напруги і нестабільність у роботі мереж можуть призводити до пошкоджень обладнання і витрат виробництва. Компенсація реактивної потужності допомагає підтримувати стабільні рівні напруги, що сприяє безпечній та надійній роботі електричних мереж;

5. Підтримка інтеграції відновлюваних джерел енергії. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, вимагає додаткового управління реактивною потужністю для забезпечення стабільності мережі через їхню змінність і непередбачуваність.

Компенсація реактивної потужності залишається надзвичайно актуальною через постійне зростання енергетичних потреб, необхідність підвищення енергоефективності, зменшення витрат, стабілізацію електричних мереж і підтримку інтеграції відновлюваних джерел енергії. Впровадження сучасних технологій компенсації дозволяє оптимізувати роботу електричних мереж, забезпечуючи їхню надійність і ефективність. Вибір конкретного методу або технології залежить від особливостей мережі, економічних міркувань та технічних вимог.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасних електроенергетичних системах, інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) значно впливає на режими роботи мережі, зокрема на розподіл реактивної потужності та рівень активних витрат. Використання конденсаторних установок для компенсації реактивної потужності є одним із ефективних методів зниження цих витрат.

У навчальному посібнику [2] розглянуто структуру та причини витрат електроенергії в електричних мережах, а також методи їх зниження. Особлива увага приділяється оптимальному керуванню режимами електроенергетичних систем для мінімізації витрат під час транспортування та розподілу електроенергії.

У конспекті лекцій [3] детально описано математичні методи оптимізації режимів роботи електроенергетичних систем. Зокрема, розглядається задача мінімізації витрат активної потужності в мережі шляхом використання принципу найменшої дії та застосування пристроїв компенсації реактивної потужності.

У статті [4] досліджується ефективність застосування керованих пристроїв компенсації реактивної потужності для зниження витрат електроенергії та оптимізації вибору перетину повітряних ліній електропередачі. Результати свідчать про доцільність використання таких пристроїв у мережах з ВДЕ.

У монографії [5] розглядаються методи оптимізації режимів роботи електричних мереж з інтегрова-

ними ВДЕ. Особлива увага приділяється питанням компенсації реактивної потужності та мінімізації витрат електроенергії.

В роботі [6] досліджуються методи визначення оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності в мережах з розосередженими джерелами генерації, що сприяє зниженню витрат та підвищенню ефективності роботи системи

У статті [7] пропонується концепція ринку реактивної потужності для майбутніх електричних мереж з високим рівнем проникнення ВДЕ. Розглядаються механізми компенсації реактивної потужності та їх вплив на стабільність та ефективність роботи мережі.

Аналіз літературних джерел свідчить про актуальність теми мінімізації активних витрат потужності в електричних мережах з ВДЕ шляхом застосування конденсаторних установок. Різні дослідники пропонують математичні моделі та практичні підходи для оптимізації режимів роботи таких систем, підкреслюючи важливість комплексного підходу до вирішення цієї проблеми.

## III. МЕТА РОБОТИ

Вдосконалення методу оптимізації активних витрат потужності в мережах із використанням динамічного управління параметрами конденсаторних установок, враховуючи змінність генерації та навантажень.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Метою моделювання є мінімізація витрат потужності в системі з урахуванням тимчасових змін генерації та навантаження, а також динамічного регулювання конденсаторних установок [13]-[14].

Для моделювання енергомережі 35/10кВ будуть використовуватися наступні елементи:

- джерело живлення або балансуєчий вузол 35кВ;
- лінії електропередачі;
- активне та реактивне навантаження 10кВ;
- відновлювальні джерела електроенергії 35кВ;
- трансформатори з регулюванням під напругою (РПН);
- конденсаторні установки (КУ) 10кВ;
- вимірювальні прилади струму та напруги;
- регулюючі блоки керування та зворотного зв'язку.

Нижче будуть більш детально описано наведені моделі та блоки Simulink, які використовуються в роботі.

Джерело живлення або балансуєчий вузол 35кВ представлено блоком - Three-phase voltage source.



Блок Three-phase voltage source має наступну конфігурацію – лінійна напруга 35кВ, частота – 50Гц, опір джерела живлення не враховується в моделюванні.

Лінії електропередачі 35кВ представлено блоком - Three-Phase Series RLC Branch. Цей блок моделює ЛЕП як трьохфазний еквівалент послідовного з'єднання резистора (R), індуктивності (L) і ємності (C), в нашому випадку значенням ємності можна знехтувати. Блок підходить для моделювання, якщо довжина лінії сягає декількох десятків кілометрів.

Активне та реактивне навантаження 10кВ представлено блоком - Three-phase dynamic load.

Параметри навантаження мають номінальну лінійну напругу 10кВ, частоту 50Гц. Так як навантаження буде мати динамічний характер, то значення параметра Active and reactive power at initial voltage рівні 0 і активовано управління по зовнішньому сигналу - External control of PQ. Реалізація динамічного активного та реактивного навантаження буде виконуватися через блок Signal editor.

Відновлювальні джерела електроенергії 10кВ, а саме СЕС представлено блоком - PV array.

Сам по собі тільки один блок PV array не зможе генерувати активну потужність, для його правильної роботи необхідно створити цілу систему включаючи інвертор, детально описувати кожен елемент PV системи не має необхідності, результати симуляції в виді графіків наглядно покажуть коректність роботи СЕС.

Трансформатори 35/10кВ з РПН представлено блоком - Three-Phase OLTC Regulating Transformer.

Первинна обмотка трансформатору має з'єднання

– Y, вторинна - Δ, номінальна потужність задана 4

МВА, частота 50 Гц, напруга первинної обмотки 35кВ, вторинної 10кВ.

Реалізація функції РПН виконується за допомогою регулюючих блоків керування та зворотного зв'язку. РПН має діапазон  $\pm 4 \times 2,5\%$ .

Конденсаторні установки 10кВ представлено блоком - Three-Phase parallel RLC load. Номінальна напруга КУ 10кВ, частота 50 Гц, потужність вказано для прикладу 250кВАр, рис.1-2.

Для управління реактивною потужністю в енергосистемі використовується автоматизований підхід на основі можливостей MATLAB. Управління КУ здійснюється через блоки Breaker і Controlled Capacitor, які автоматично підключають або відключають конденсаторні батареї на основі поточного реактивного навантаження.

Ці блоки реагують на зміни в системі та адаптивно регулюють ємність КУ для мінімізації активних

втрат. Оптимізація роботи конденсаторів здійснюється на основі поточного стану мережі.

Використання цих блоків дає можливість керувати системою без необхідності впровадження складних алгоритмів, таких як Model Predictive Control (MPC) або градієнтний спуск, при цьому досягається висока ефективність за рахунок автоматичної адаптації системи.

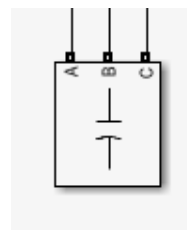


Рисунок 1. Блок Three-Phase parallel RLC load

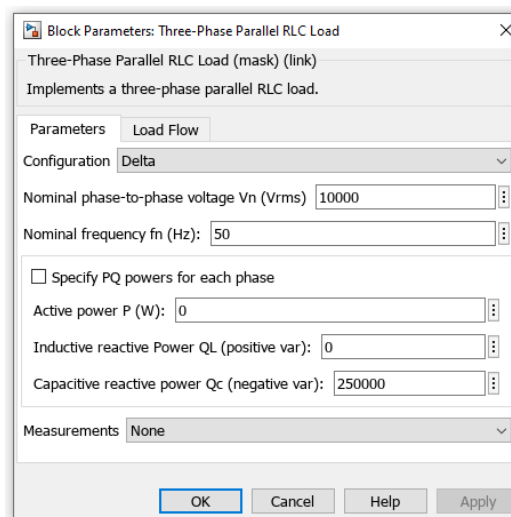


Рисунок 2. Налаштування блоку Three-Phase parallel RLC load

Оптимізаційне завдання полягає у виборі такої функції  $Q_{KV_i}(t)$ , яка мінімізує сумарні втрати потужності:

$$\Delta P \rightarrow \min = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \int_0^T \left( \frac{(P_{нав i}(t) - P_{ВДЕ i}(t))^2 + (Q_{нав i}(t) - Q_{KV_i}(t))^2}{U^2} \right) \cdot R_i dt \\ Q_{KV_i}(t) \leq Q_{нав}(t) \\ U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \end{cases}$$

Дана цільова функція буде представлена в процесі моделювання в MATLAB вище наведеними блоками.

Моделювання буде виконано в 3 етапи:

1. Моделювання енергосистеми без врахування ВДЕ та КУ;
2. Моделювання енергосистеми з врахування генерації ВДЕ;
3. Моделювання енергосистеми з врахування генерації ВДЕ та КУ.

Для моделювання було обрано ділянку діючого енерговузла, який складається з 2-х ПС, на його прикладі і буде застосовано запропонований метод оптимізації активних втрат. Кількість вузлів не є важливим фактором, цільова функція є універсальною. В подальших етапах моделювання додасться ВДЕ, а саме СЕС 35кВ потужністю 1МВт та КУ 10кВ на ПС2.

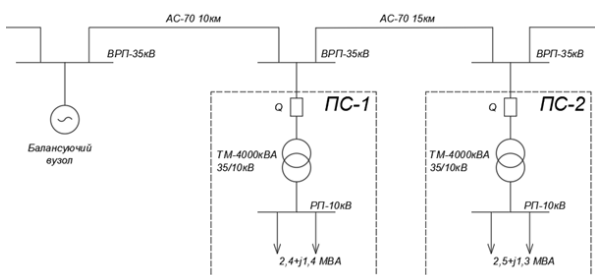


Рисунок 3. Приклад модельованої мережі

Для наочності графіків, при виконанні моделювання спеціально підібрано такі проміжки часу між змінами величини навантажень, які дозволяють кожній величині навантаження пройти перехідний процес

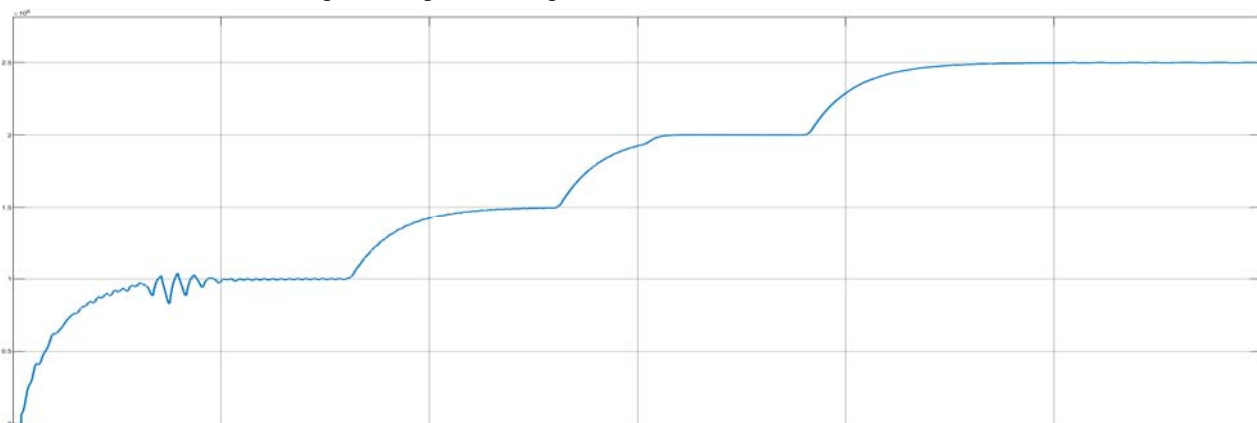


Рисунок 5. Активне навантаження ПС1

та вийти на стає значення.

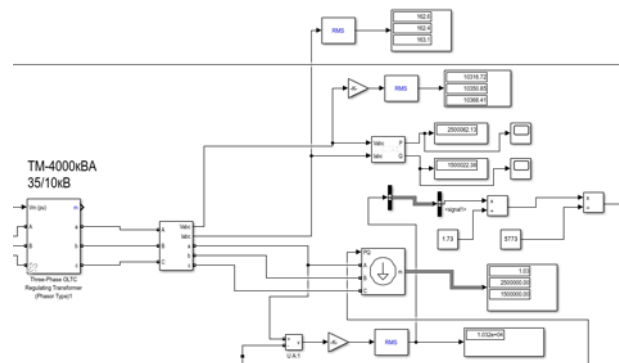


Рисунок 4. ПС1 в МАТЛАБ

Як приклад перша зміна навантаження на ПС 1 від 1 МВт до 1,5 МВт займає час від 0,8 до 1,2с, тому в цей період і трохи часу після нього даємо змогу навантаженню вийти на сталий рівень, зафіксувати по різним приладам відповідні дані та аж потім змінювати величину навантаження далі.

Далі з 1,3с до 1,8 відбувається зміна навантаження до значення 2МВт і остання зміна навантаження відбувається з 1,9с 2 МВт до 2,5 МВт 2,4с, значення навантаження 2,5 МВт буде триматись до кінця моделювання.

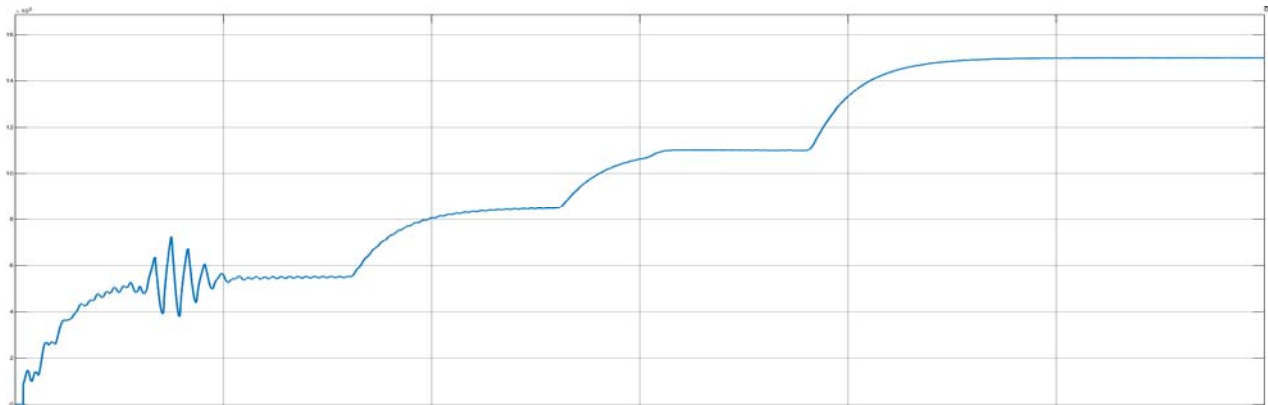


Рисунок 6. Рективне навантаження ПС1

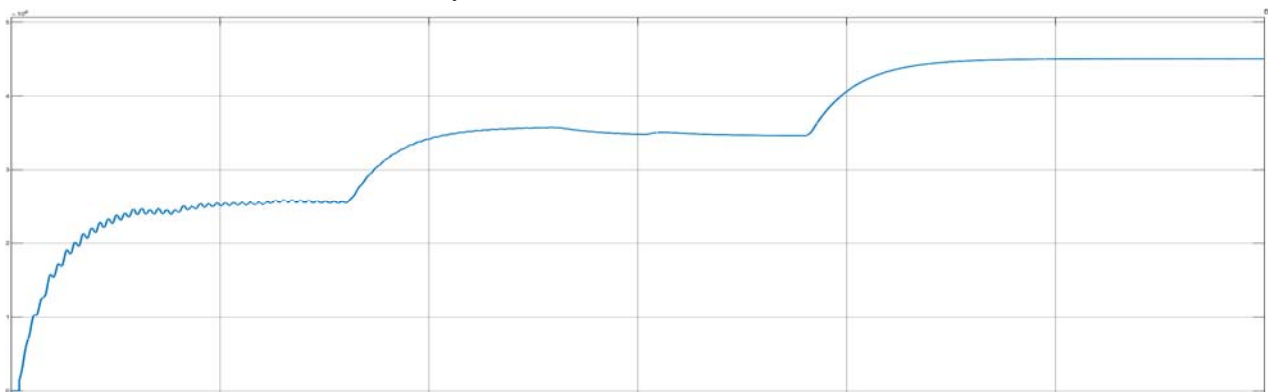


Рисунок 7. Активне навантаження ділянки БВ-ПС1

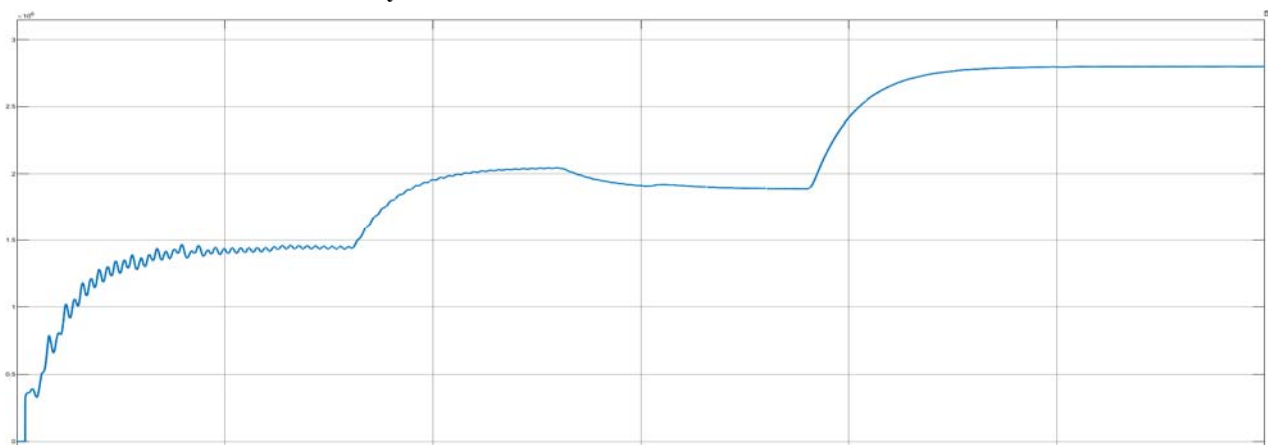


Рисунок 8. Реактивне навантаження ділянки БВ-ПС1

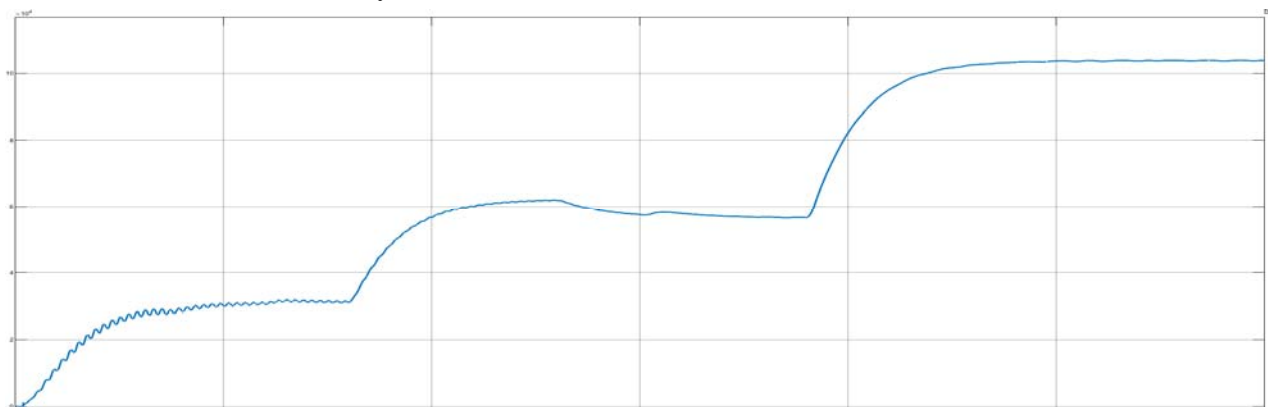


Рисунок 9. Графік активних втрат ділянки БВ-ПС1

Реактивна потужність ПС 1, що представлена на рис. 6 змінюється відповідно до змін активного навантаження, часовий проміжок однаковий. Як видно з рис. 6, від 0-0,8с реактивна потужність проходить перехідний період та приймає значення 0,55 МВАр, далі йде збільшення споживання до 0,85 МВАр, далі до 1,1 МВАр і остання зміна до 1,5 МВАр.

Графіки ПС2 мають аналогічний візуал, тільки змінюються величини навантажень:

Активне навантаження ПС 2: 0-0,8с – 1,5 МВт; 0,8-1,3с – 2 МВт; 1,3-1,9с – 1,4 МВт; 1,9с – 2,3 МВт.

Рективне навантаження ПС 2: 0-0,8с – 0,8 МВАр; 0,8-1,3с – 1,1 МВАр; 1,3-1,9с – 0,7 МВАр; 1,9с – 1,2 МВАр.

Так як енерговузол отримує живлення через ділянку БВ-ПС1, приведемо графік активного та реактивного споживання на рис. 7-8, а на рис. 9 покажемо активні втрати енергії по цій ділянці.

Як видно з рис. 9, графік активних втрат повторює графік активного навантаження, що являється енергетичною закономірністю.

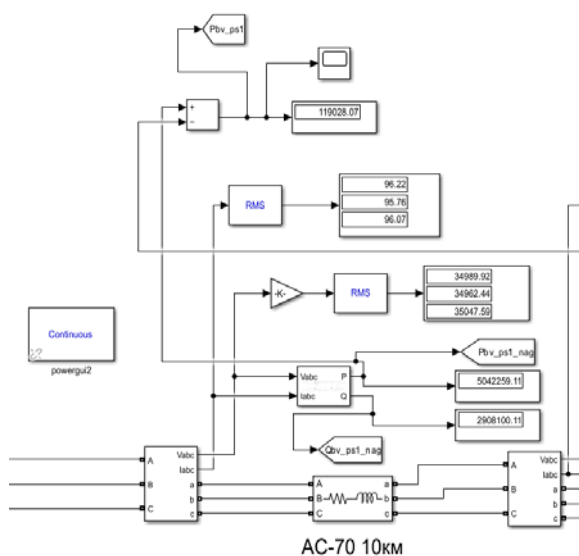


Рисунок 10. Ділянка БВ-ПС1 в момент часу 3с.

Як видно з рис. 10, в момент часу 3с. навантаження лінії становить  $5,042+j2,908$ . Розрахуємо струм:

$$I_{БВ-ПС1} = \frac{\sqrt{5042^2 + 2908^2}}{35 \cdot \sqrt{3}} = 96,01 \text{ A}$$

Як видно з рис. 10, струм становить 96,22 А, модель адекватна.

Розрахуємо втрати потужності ділянки БВ – ПС 1:

$$\Delta P = 3 \cdot 96,01^2 \cdot 4,28 = 0,1183 \text{ МВт}$$

або

$$\Delta P = \left( \frac{5042^2 + 2908^2}{35^2} \right) \cdot 4,28 = 0,1183 \text{ МВт}$$

Як видно з рис. 10, активні втрати становлять 0,119 МВт, модель адекватна. Дані відповідають дійсності.

Для другого етапу моделювання додаємо в систему генерацію ВДЕ, яка буде мати стохастичний характер, тобто генерація буде змінюватися, в залежності від погодних явищ, як в реальних умовах [15-16].

СЕС 35кВ буде розміщуватися біля ПС2. СЕС почне генерацію в момент часу 0,5с.

Генерація активної енергії СЕС: 0-0,5с – 0,5 МВт; 0,5-0,9с – 0,7 МВт; 0,9-1,5с – 1 МВт; 2с – 0,8 МВт.

Як видно з рис. 11 активні втрати електричної енергії зменшуються при впровадженні СЕС.

Це відповідає дійсності, адже якщо розташувати джерело активної енергії біля споживача, це дозволяє розвантажити всі пристрої, які приймають участь в передачі електричної енергії.

Як видно з рис. 14, в момент часу 3с. навантаження лінії становить  $3,765+j2,853$ . Розрахуємо струм:

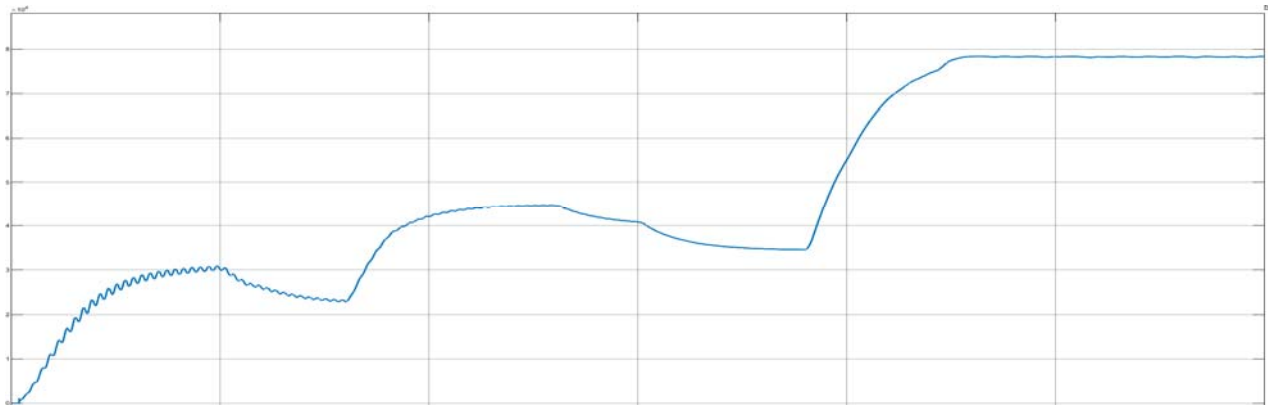


Рисунок 11. Графік активних втрат ділянки БВ-ПС1 після впровадження СЕС



Рисунок 12. Графік реактивного навантаження ділянки БВ-ПС1 після впровадження СЕС та КУ

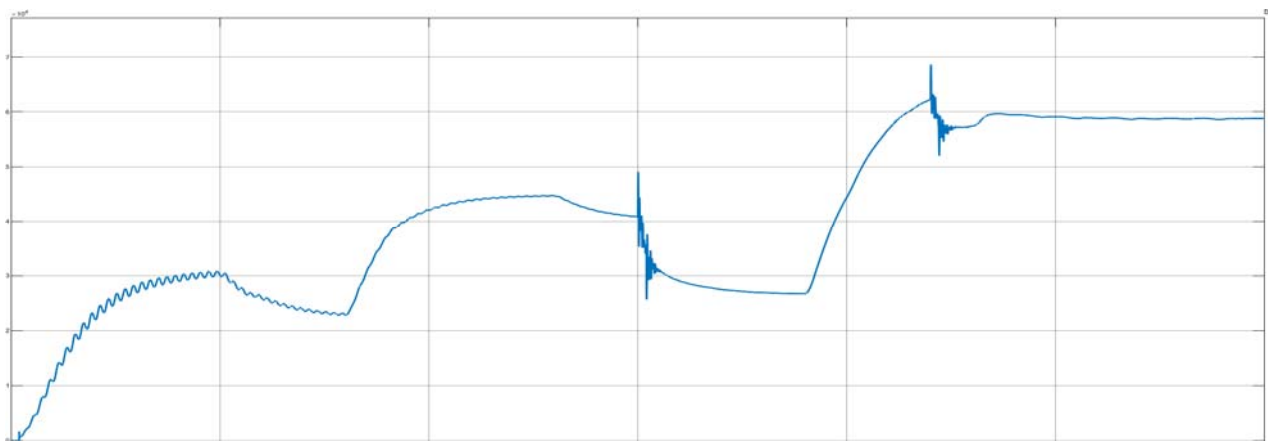


Рисунок 13. Графік активних втрат ділянки БВ-ПС1 після впровадження СЕС та КУ

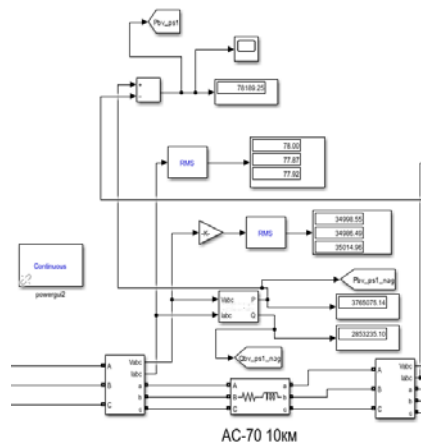
$$I_{\text{БВ-ПС1 з ВДЕ}} = \frac{\sqrt{3765^2 + 2853^2}}{35 \cdot \sqrt{3}} = 78 \text{ A}$$

Всі розрахунки збігаються з моделюванням.

Розрахуємо втрати потужності ділянки БВ – ПС

1:

$$\Delta P = 3 \cdot 78^2 \cdot 4,28 = 0,0781 \text{ MВт}$$



**Рисунок 14.** Ділянка БВ-ПС1 в момент часу 3с. при впровадженні ВДЕ

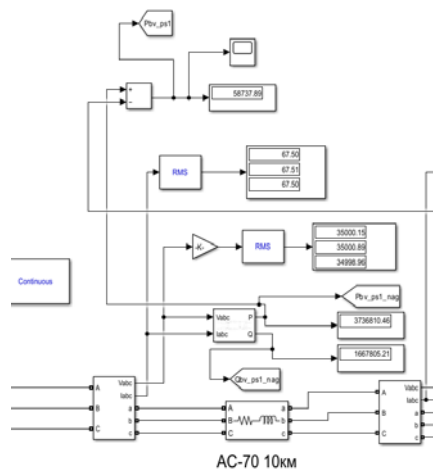
Отже, активні втрати головної ділянки зменшено, якщо прив'язатись до моменту часу 3с., з величини 0,119 МВт до 0,078 МВт, що в процентному відношенні становить 35%.

Для 3-го етапу моделювання впроваджується автоматична КУ 10кВ, яка буде «відсліджувати» зміну реактивного навантаження на ПС2 та автоматично змінюючи номінальну потужність компенсувати необхідну реактивну потужність.

КУ почне працювати з 1,5с моделювання для наглядності роботи. На рис. 12 показано графік реактивного навантаження ділянки БВ-ПС1 після впровадження СЕС та КУ, як видно з графіка видно чітку залежність в момент підключення КУ, вся залишкова реактивна потужність, яка передається по цій ділянці лінії йде до ПС1, так як ПС2 повністю споживає реактивну потужність з КУ.

Як видно з рис. 13 активні втрати ще більше зменшуються завдяки впровадженню автоматичної КУ.

Як видно з рис. 15 в момент часу 3с. навантаження лінії становить  $3,736+j1,667$ , струм 67 А, активні втрати 0,0587МВт.



**Рисунок 15.** Ділянка БВ-ПС1 в момент часу 3с. при впровадженні ВДЕ та КУ

Отже, активні втрати головної ділянки зменшено завдяки інтеграції ВДЕ та впровадженню КУ, якщо прив'язатись до моменту часу 3с., з величини 0,119 МВт до 0,0587 МВт, що в процентному відношенні становить 50%.

## V. ВИСНОВКИ

Розроблена модель для оптимізації активних втрат потужності в електричних мережах дозволяє досягти поставлених бажаних результатів, серед яких: зниження втрат активної потужності, енергоефективна робота мережі та підвищення стабільності її функціонування при змінних умовах навантаження та генерації.

На основі критеріїв оцінки якості результатів модель демонструє можливість:

- Значного зменшення активних втрат потужності, що підтверджується балансом потужності до та після впровадження оптимізацій [17].
- Поліпшення показників якості електроенергії, зокрема напруги та коефіцієнта потужності у вузлах мережі.
- Ефективного використання компенсаційних пристроїв, які суттєво знижують втрати та забезпечують стабільну роботу системи.

Водночас виконані розрахунки враховують обмеження: технічні характеристики елементів мережі, допустимі рівні напруги у вузлах, обмеження потужності компенсаційних пристроїв та економічну доцільність впровадження рішень.

Таким чином, реалізована модель в середовищі MATLAB забезпечує комплексне рішення задачі оптимізації режимів електричних мереж із використанням компенсаційних пристроїв та інтегрованих джерел відновлюваної енергії. Це відкриває можливості для подальшого розвитку систем енергозабезпечення із мінімізацією втрат та підвищенням їхньої надійності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kupin A.I., Osadchuk Yu.G., Savytsky O.I., Sherstnov Yu.V. Enhancement of the voltage supply quality of substations at mining and processing plants // Tavrichesky National University named after V. I. Vernadsk. – 2022. – Pp. 149–159. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/23>.
- [2] Лежнюк П.Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
- [3] Лесько В.О., Кулик В.В., Нетребський В.В. Конспект лекцій: «Оптимізація режимів електроенергетичних систем». – Вінниця: Вінницький національний технічний університет ФЕЕЕМ, 2020. – 138 с.
- [4] Кучанський В.В., Сабарно Л.Р., Кошман В.І.

- Оцінювання впливу керованих пристроїв компенсації реактивної потужності на вибір перетину повітряної лінії // Інститут електродинаміки НАН України. – 2022. 1–10 с.
- [5] Рубаненко О.С., Гунько І.О., Лежнюк П.Д. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 174 с.
- [6] Грицюк І.В. Визначення економічно обґрунтованих рівнів компенсації реактивної потужності в електричних мережах з розосередженим генеруванням // Луцький НТУ. – 2014. – Вип. 15. – С. 54–59.
- [7] Potter A., Haider R. A Reactive Power Market for the Future Grid // *Advances in Applied Energy*. – 2022. – Pp. 1–14.
- [8] Danylchenko D.O., Kuznetsov D.S. Use of reactive power compensation devices at stations with renewable energy sources // *Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health*. – 2022. – ISSN 2222-2944. – P. 70.
- [9] Shevchenko S., Danylchenko D., Kuznetsov D., Petrov S. Use of Capacitor Batteries to Improve the Quality of Electrical Energy // *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. – 2021. – Pp. 666–669.
- [10] Данильченко Д.О., Кузнецов Д.С. Використання пристроїв компенсації реактивної потужності при впровадженні розподіленої генерації // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2024. – Вип. 1(8). – С. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.08>.
- [11] Johnson L., Lee M. Reactive Power Management for Renewable Energy Integration // *Renewable Energy Global (REGlobal)*. – 2020. – Vol. 12, No. 3. – Pp. 45–49.
- [12] Müller P., Wang S. Reactive Power Support from Converter Connected Renewables in Low-Voltage Grids // *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. – 2022. – Pp. 1327–1331.
- [13] Patel K., Kumar R. A Comprehensive Review of Advancements and Challenges in Reactive Power Compensation for Renewable Energy Systems // *Energy Informatics*. – 2024. – Vol. 8, No. 1. – Pp. 112–117.
- [14] Zeng Y., Zhou B., Zhu J. Coordinated Active-Reactive Power Management of Renewable Power-to-Hydrogen Systems with Multiple Electrolyzers // *arXiv preprint*. – 2023. – arXiv:2312.14473.
- [15] Nepal R.K., Khanal B., Khatiwada S. Compensation for Reactive Power and Harmonic Current Drawn by a Non-linear Load in a PV-Micro Hydro Grid // *arXiv preprint*. – 2024. – arXiv:2406.05342.
- [16] Pan S., Maleki S., Lakshminarayana S. Optimal Placement and Power Supply of Distributed Generation to Minimize Power Losses // *arXiv preprint*. – 2023. – arXiv:2308.15789.
- [17] Doe J., Smith A. Reactive Power Compensation with PV Inverters for System Loss Reduction // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, No. 21. – P. 4062.

Стаття надійшла до редакції 31.10.2024 р.

## APPLICATION OF AN ADVANCED OBJECTIVE FUNCTION TO MINIMIZE ACTIVE POWER LOSSES

DANYLCHENKO D.O. Ph.D., Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Energy Transmission of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: [Dmytro.Danylchenko@kphi.edu.ua](mailto:Dmytro.Danylchenko@kphi.edu.ua), ORCID: 0000-0001-7912-1849;

KUZNETSOV D.S. graduate student of the Department of Electrical Energy Transmission of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: [dmytro.kuznetsov@ieeee.kphi.edu.ua](mailto:dmytro.kuznetsov@ieeee.kphi.edu.ua), ORCID: 0009-0003-1543-7854;

**Purpose of the work.** *The improvement of the method for optimizing active power losses in networks using dynamic control of capacitor bank parameters, taking into account the variability of generation and loads. Research methods.* Analysis of an electrical system modeled in MATLAB using elements of renewable energy sources and capacitor banks. The study of optimizing active power losses is carried out by using an improved objective function that includes the multifactorial nature of the system and certain restrictions. A comparison of active losses and their changes in the presence of renewable energy sources and capacitor banks in the electrical network is carried out.

**Results obtained.** *The obtained modeling results demonstrate the practical applicability of the proposed method for reducing active losses in the system. This, in turn, leads to a reduction in costs for network operation and maintenance, a reduction in energy losses, and an improvement in the quality of energy supply. Reducing active losses contributes to increasing the economic efficiency of the power system.*

*Modeling in MATLAB/Simulink provides the ability to conduct analysis to assess the behavior of the system under various operating conditions, such as peak loads or sharp fluctuations in generation. This allows to ensure the*

*flexibility and adaptability of the power system to real operating conditions.*

*The results obtained also contribute to solving sustainable development problems, as they ensure effective integration of RES without deteriorating the stability and parameters of the network.*

**Scientific novelty.** *A comprehensive modeling of the power system operation is proposed, taking into account the dynamic control of capacitor units and the integration of renewable energy sources (RES), which allows to assess the effectiveness of various compensation measures and their impact on active losses. The scientific novelty lies in creating a model that takes into account the variable nature of the load, transmission line parameters and unstable RES generation, providing a comprehensive approach to optimizing the operation of the power system.*

**Practical value.** *Improving the objective function to minimize active power losses by adding capacitor banks to the generation function, changing the generation of renewable energy sources, and changing the load of the PV system (active and reactive), this allowed a more accurate assessment of the impact of reactive power and RES integration on active losses, and increased the efficiency of power system management by taking into account the real operating conditions of the system (load and generation dynamics).*

**Keywords:** *distributed generation sources; renewable energy; reactive power compensation devices; electrical network; losses; implementation.*

## REFERENCES

- [1] Kupin A.I., Osadchuk Yu.G., Savytsky O.I., Sherstnov Yu.V. (2022). Enhancement of the voltage supply quality of substations at mining and processing plants. Tavrishesky National University named after V. I. Vernadsk, 149-159. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/23>
- [2] Lezhnyuk P.D. (2018). Electricity-saving technologies in electric networks of power systems. Lutsk: IVV Lutsk NTU. 328.
- [3] Lesko V. O., Kulyk V. V., Netrebsky V. V. (2020). Lecture notes: "Optimization of power system regimes". Vinnytsia National Technical University FEEEM. 138.
- [4] Kuchansky V. V., Sabarno L. R., Koshman V. I. (2022). Assessment of the influence of controlled reactive power compensation devices on the choice of overhead line cross-section. Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine. 1-10.
- [5] Rubanenko O. Ye., Gunko I. O., Lezhnyuk P. D. (2018). Optimization of power grid modes with renewable energy sources. VNTU. 174.
- [6] Hrytsyuk I. V. (2014). Determination of economically justified levels of reactive power compensation in power grids with distributed generation. Lutsk NTU. Issue 15. 54-59.
- [7] Potter A., Haider R. (2022). A Reactive Power Market for the Future Grid. *Advances in Applied Energy*. 1-14.
- [8] Danylchenko, D.O., Kuznetsov, D.S. (2022). Use of reactive power compensation devices at stations with renewable energy sources. ISSN 2222-2944. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health*, 70.
- [9] Shevchenko, S., Danylchenko, D., Kuznetsov, D., Petrov, S. (2021). Use of Capacitor Batteries to Improve the Quality of Electrical Energy. *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 666 – 669 .
- [10] Danilchenko, D. O., and D. S. Kuznetsov. (2024). "Use of reactive power compensation devices in the implementation of distributed generation". *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, Vol. 1 (8). 24-31. doi:10.20998/2224-0349.2024.01.08.
- [11] Johnson, L., Lee, M. (2020). Reactive Power Management for Renewable Energy Integration. *Renewable Energy Global (REGlobal)*, 12(3). 45-49.
- [12] Müller, P., Wang, S. (2022). Reactive Power Support from Converter Connected Renewables in Low-Voltage Grids. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 1327-1331.
- [13] Patel, K., Kumar, R. (2024). A Comprehensive Review of Advancements and Challenges in Reactive Power Compensation for Renewable Energy Systems. *Energy Informatics*, 8(1).112-117.
- [14] Zeng, Y., Zhou, B., Zhu, J. (2023). Coordinated Active-Reactive Power Management of Renewable Power-to-Hydrogen Systems with Multiple Electrolyzers. *arXiv preprint, arXiv:2312.14473*.
- [15] Nepal, R.K., Khanal, B., Khatiwada, S. (2024). Compensation for Reactive Power and Harmonic Current Drawn by a Non-linear Load in a PV-Micro Hydro Grid. *arXiv preprint, arXiv:2406.05342*.
- [16] Pan, S., Maleki, S., Lakshminarayana, S. (2023). Optimal Placement and Power Supply of Distributed Generation to Minimize Power Losses. *arXiv preprint, arXiv:2308.15789*.
- [17] Doe, J., Smith, A. (2019). Reactive Power Compensation with PV Inverters for System Loss Reduction. *Energies*, 12(21). 4062.



УДК 621.316.5

## МЕТОДИКА ПОШУКУ ПРИЄДНАННЯ З ДЕФЕКТОМ ОБЛІКУ СЕРЕД ДЕКІЛЬКОХ ПРИЄДНАНЬ НА ОДНІЙ СЕКЦІЇ ШИН

- ВОЛОШКО А. В. д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: avolosko820@gmail.com, ORCID0000-0002-6857-2060;
- БЕДЕРАК Я. С. канд. техн. наук, Приватне акціонерне товариство «АЗОТ», м. Черкаси, Україна, e-mail: yaroslav0768@gmail.com, ORCID0000-0002-2669-0965;
- КОЗЛОВСЬКИЙ Є. В. аспірант гр. ГЕ-41ф, ІЕЕ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: eugene.kozlovskiy@gmail.com, ORCID0009-0009-2753-3900;

**Мета роботи.** Метою даної роботи є розробка методології пошуку дефектного приєднання на одній секції шин середньої або низької напруги серед декількох паралельно ввімкнених приєднань.

**Методи дослідження.** Як відомо, від секції шин головної понижувальної підстанції вищою напругою 35÷154 кВ, тупикової підстанції середньої напруги 10 (6) кВ або трансформаторної підстанції напругою 10(6)/0,4 кВ можуть живитися одночасно від трьох до двох десятків приєднань. Дефект приладу обліку на одному з цих приєднань може бути виявлений тільки за допомогою балансового методу (коли на ввіді на секцію шин встановлений прилад обліку (зазвичай, комерційного обліку) та на кожному з приєднань, що відходять з секції шин, теж встановлений лічильник електроенергії).

Пошук дефектного приладу обліку проводиться шляхом перевірки усіх приладів обліку на кожному приєднанні. Серед них і буде виявлений дефектний прилад.

Але ця процедура зазвичай займає багато часу, потребує оформлення організаційно-технічних заходів при роботах в діючих електроустановках, може призвести до аварійних відключень приєднань внаслідок закорочування кіл напруги або розмикання кіл струму при неправильних або помилкових діях персоналу.

**Отримані результати.** Визначено чотири основні типи дефектів у схемах обліку. Показано, що небаланс між комерційним і технічним обліком може бути використаний для виявлення дефектів на секції шин. Розроблено критерії для швидкої ідентифікації дефектних приєднань на основі статистичних методів, таких як кореляційний аналіз та однофакторний дисперсійний аналіз.

**Наукова новизна.** На відміну від існуючого підходу запропонована послідовність та розроблені критерії знаходження приєднання з дефектом обліку саме аналітичним методом. В результаті необхідно буде провести заміну приладу або пристрою обліку тільки на одному приєднанні, котре підключено до секції шин, де є дефект в колах обліку. Аналітичний метод ґрунтується на обробці облікових даних та розрахунку декількох статистичних коефіцієнтів.

**Практична цінність.** В найкоротший термін знайти дефект приладу обліку аналітичним методом. Методика забезпечує швидке та точне виявлення дефектних приєднань на секції шин, що дозволяє уникати аварійних ситуацій та втрат енергії. Це робить її корисною для промислових підприємств, що працюють із великими енергоспоживаннями.

**Ключові слова:** облік електроенергії; лічильник електроенергії; балансовий метод; приріст небалансу; коефіцієнт взаємної кореляції; критерій Фішера.

### І. ВСТУП

Основою техніко-економічних розрахунків, що виконуються при аналізі щодобового та щомісячного електроспоживання підприємства, під час підготовки документів статистичної звітності та визначення рівня енергоефективності виробничих процесів, є відомості про обсяги спожитої електроенергії, котра розподіляється по системі електропостачання промислового підприємства між виробничими підрозділами та технологічними агрегатами.

Кількість спожитої електроенергії обчислюється за показниками лічильників електроенергії. Лічильник електроенергії, вимірювальні

трансформатори струму та напруги входять у склад вимірювальних каналів (ВК). Вимірювальні прилади та електричні апарати, з яких складаються ВК, вносять похибку у виміри, а часткове пошкодження або повна відмова їх в роботі призводять до грубих спотворень показників енергообліку. Інколи дані про електроспоживання передаються з лічильника електроенергії через пристрої збору та передачі даних. Трапляються ситуації, коли внаслідок помилок в їх роботі на сервер також надходять недостовірні облікові дані. Тому необхідність у постійному забезпеченні достовірності первинних облікових даних є очевидною.

Заходи, що вживаються в даний час, визначені

рамками технічного обслуговування, метрологічного контролю та нагляду за засобами обліку електроенергії. Але, як показує практика, цього недостатньо, щоб виключити чи послабити вплив грубих помилок у вимірах на точність кількісних показників електроспоживання.

На додаток до перерахованих вище заходів є важливим організувати раннє виявлення фактів порушення достовірності облікових даних, забезпечити точність ідентифікації дефектного вимірювального комплексу та оперативність при заміні пошкодженого технічного пристрою.

Як відомо, від секції шин напругою 6, 10 або 35 кВ головної понижувальної підстанції класом вищої напруги 35÷154 кВ, тупикової підстанції середньої напруги 6÷35 кВ або розподільного щита трансформаторної підстанції напругою 0,4 кВ можуть житися одночасно від трьох до двох десятків приєднань. Дефект приладу обліку на одному з цих приєднань може бути виявлений тільки тоді, коли на ввіді на секцію шин встановлений прилад обліку (звичай, комерційного) та на кожному з приєднань, що відходять з секції шин, теж встановлений лічильник електроенергії технічного обліку).

Пошук приєднання, де є дефект, проводиться зазвичай таким чином, що персонал на підстанції перевіряє усі приєднання. Серед них буде обов'язково знайдено приєднання з дефектом. При чому проблема може бути або на всіх приєднаннях, або тільки на одному.

Ця процедура зазвичай займає багато часу, потребує оформлення організаційно-технічних заходів при роботах в діючих електроустановках, може призвести до аварійних відключень приєднань внаслідок закорочення кіл напруги або розмикання кіл струму внаслідок неправильних або помилкових дій електротехнічного персоналу.

Виявити, що на секції шин є приєднання з дефектом обліку, дозволяє балансовий метод. Балансовий метод дозволяє виявити сам факт присутності помилок у облікових даних та оцінити розміри спотворення. Для цього щодоби, а найчастіше щомісяця складається баланс надходження та відпуску електроенергії на підстанціях за показниками лічильників на 24:00 останньої доби звітного періоду. Значення фактичного небалансу не повинно перевищувати допустимого величину.

Як відомо, фактичний небаланс в відсотках  $НБ_{\phi}$  обраховується згідно показників приладів обліку як різниця між електроенергією, що поступила на об'єкт  $W_n$  та відпущеною електроенергією  $W_e$ .

Значення допустимого небалансу електроенергії у відсотках  $НБ_{\delta}$  визначається за формулою [1], що враховує максимально допустимі відносні похибки  $\delta W_i$  кожного вимірювального каналу, а також частку електроенергії  $d_i$ , котра надійшла по всіх вимірювальних каналах прийому електроенергії  $N_n$  і частку елек-

троенергії  $d_j$ , що надійшла по всіх вимірювальних каналах її відпуску  $N_o$ :

$$НБ_{\delta} = \pm \sqrt{\left( \sum_{i=1}^{N_n} \delta W_i^2 d_i^2 + \sum_{j=1}^{N_o} \delta W_j^2 d_j^2 \right) \cdot 100\%}.$$

Максимально допустима відносна похибка вимірювального каналу розраховується за формулою:

$$\delta W_i = \pm \sqrt{\delta I^2 + \delta U^2 + \delta_{Лч}^2 + \delta_{л}^2},$$

де  $\delta_i$ ,  $\delta_U$ ,  $\delta_{Лч}$ ,  $\delta_{л}$  – похибки трансформатора струму (ТС), трансформатора напруги (ТН), лічильника, в лінії від лічильника до трансформатора напруги внаслідок втрат у ній відповідно.

У разі, коли  $НБ_{\phi}$  не перевищує  $НБ_{\delta}$ , облік електроенергії може бути визнаний достовірним. З досвіду, розбіжність між  $НБ_{\phi}$  та  $НБ_{\delta}$  теоретично (для ситуації, коли є 1 лічильник кл. 0,5 на ввіді секції шин 6 кВ, 3 лічильника кл. 1,0 на приєднаннях технічного обліку, трансформатори струму та напруги повсюди кл. 0,5) досягає 1,2÷1,5%, але у зв'язку з малим завантаженням трансформатора струму може на практиці досягати й 3%.

Коли вже небаланс перевищує 4÷5 % від величини електроспоживання на комерційному обліку, то необхідно вже приймати заходи для усунення можливого дефекту. При такій ситуації облік є недостовірним і персонал підстанції повинен з'ясувати причини небалансу та вжити заходів щодо їх усунення.

Слід зазначити, що появу «поганих» даних у вимірах можна знайти ранні терміни, якщо контрольні функції виконувати щодоби протягом місяця. Таку обчислювальну процедуру здійснити нескладно за наявності у підприємства автоматизованої системи обліку електроенергії (АСОЕ). Основні труднощі під час доказу облікових даних виникають на етапі пошуку несправного вимірювального комплексу.

Таким чином, актуальним є завдання розробки послідовності знаходження приєднання з дефектом обліку аналітичним методом. Тоді необхідно буде провести ревізію схеми обліку тільки на тому приєднанні, де є дефект.

Успішно ідентифікуються такі дефекти обліку в вимірювальних каналах як:

- зупинка лічильника під навантаженням;
- підвищена похибка лічильника електроенергії внаслідок неправильної роботи його електронної схеми або складових частин індукційного лічильника;
- відмова лічильника в роботі в момент подачі напруги на електроприймач (відсутня ініціалізація);
- накид імпульсів від пристрою збору-передачі даних при імпульсній передачі даних з лічильників на сервер технічного обліку;
- недооблік лічильника електроенергії, який враховує електроспоживання тільки від першої гармоні-

ки струму у випадку роботи його на приєднанні з не-синусоїдальним навантаженням.

- ослаблення контактів вимірювальних кіл у випробувальних клемних коробках або клемних колодках лічильників та ін.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика точного енергетичного обліку та виявлення дефектів у вимірювальних комплексах отримала значну увагу в науковій літературі. В роботах [1], [3], [4] розглядаються методи забезпечення достовірності комерційного та технічного обліку електроенергії, а також аналізуються основні причини виникнення небалансів. Зокрема, в [1] описані загальні принципи комерційного обліку, що визначаються нормативною базою, тоді як [4] детально охоплює питання впровадження автоматизованих систем моніторингу енергоефективності.

Ряд дослідників зосереджуються на використанні статистичних методів для виявлення аномалій в енергоспоживанні. Наприклад, у працях [9], [10] показано ефективність застосування кореляційного аналізу та методів великих даних для оцінки точності вимірювальних пристроїв. У дослідженні [13] представлено автоматизовані рішення для швидкого виявлення втрат енергії за допомогою системного моніторингу.

Застосування сучасних інформаційних технологій у цій сфері детально висвітлено в роботах [11], [12], [14]. Наприклад, в [14] розглядається інфраструктура розумних лічильників у сучасних енергосистемах, що дозволяє підвищити точність обліку та швидкість реагування на дефекти.

Дослідження, наведені у [7], [8], [15], аналізують методології оцінки та виявлення небалансів у реальних енергосистемах. Робота [7] підкреслює важливість розробки нових критеріїв ідентифікації дефектів у колах обліку, тоді як [8] пропонує критерії оцінки небалансів, що базуються на специфіці енергосистеми.

У монографії [6] докладно описані практичні аспекти моніторингу енергоспоживання на промислових підприємствах, включаючи способи ідентифікації дефектів у схемах обліку. Водночас, робота [5] акцентує увагу на впровадженні нових технологій енергетичного контролю.

Таким чином, існує багатий науковий і технічний доробок, що стосується підвищення точності обліку електроенергії та виявлення дефектів у вимірювальних комплексах. Однак, запропоновані в даній роботі аналітичні методи є новими і спрямованими на підвищення швидкості ідентифікації дефектів, що значно зменшує час простою обладнання та втрати енергії.

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є розробка критеріїв визначення приєднання, де неправильно працюють прилади або пристрої обліку електроенергії, серед декількох паралельно ввімкнених.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дефекти обліку можуть бути:

1. На всіх приєднаннях і комерційного, і технічного обліку.

Некоректний облік на усіх приєднаннях технічного обліку внаслідок відсутності однієї фази вторинної напруги 100 В на затискачах лічильників у трьохпроводних мережах або двох фаз у чотирипроводних на усіх приєднаннях як комерційного, так і технічного обліку (**код дефекту I.1**). Дефект може виявитися тільки, коли кола усіх лічильників одержують живлення 100 В від одного й того ж ТН.

2. Тільки на одному з приєднань технічного обліку.

2.1. Бувають випадки, коли електроспоживання комерційного обліку більше за електроспоживання технічного обліку. При цьому, як правило, на якомусь приєднанні помилково зменшилось електроспоживання внаслідок неправильної роботи приладу обліку, пристрою збору-передачі даних, дефекту в схемі підключення приладу тощо.

Електроспоживання на якомусь приєднанні найчастіше дорівнює 0 внаслідок відсутності напруги на усіх фазах лічильника або виходу з ладу лічильника (**код дефекту II.1**) або зменшується за умови відсутності однієї фази по струму або по напрузі чи такої роботи лічильника електроенергії технічного обліку, котрий занижує електроспоживання (**код дефекту II.2**).

2.2. Трапляється, що електроспоживання комерційного обліку менше за електроспоживання технічного обліку. При цьому на якомусь приєднанні помилково збільшилось електроспоживання, наприклад, внаслідок неправильної роботи приладу обліку або пристрою збору-передачі даних (**код дефекту II.3**).

За останній час фахівцями-енергетиками за кордоном прийнято проводити процедуру пошуку джерела помилок, ґрунтуючись на аналізі небалансів потужності з залученням трьох відомих вибіркового характеру емпіричного розподілу: середнього значення, стандартного відхилення та коефіцієнта парної кореляції між небалансом та навантаженням кожного з приєднань підстанції, представлених у балансове рівняння. Сутність процедури полягає у цілеспрямованому відстежуванні показників динаміки цих показників у часі.

Ця теорія була перевірена авторами публікації на

експериментальних даних. Дослідження довели, що середнє значення стандартне відхилення не здатні оперативно реагувати на дефект. Несправність у якомусь вимірювальному комплексі впливає на динаміку ковзних параметрів. Абсолютні величини середнього значення та стандартного відхилення монотонно збільшуються з часом. Стійкий прояв цих кількісних та якісних ознак сигналізує про присутність грубих помилок облікової інформації, але виявлення дефекту потребує декількох часових інтервалів. І якщо дані обробляються раз на добу, то затримка в часі в 3÷5 діб неприпустима.

Перед тим, як виявляти дефекти в колах обліку, необхідно, щоби на кожній секції шин підстанції, де є і комерційний, і технічний облік, були встановлені електронні лічильники комерційного обліку та на усіх відхідних приєднаннях теж електронні лічильники технічного обліку, які по лініям зв'язку передавали б облікові дані на сервери автоматизованої системи комерційного (АСКОЕ) та технічного обліку електроенергії (АСТОЕ). Треба налаштувати також зведення даних в один шаблон розрахунку балансу між комерційним обліком (КО) та технічним обліком (ТО).

Наведемо декілька прикладів появи та усунення кожного з вищезазначених дефектів в колах обліку приєднань технічного обліку.

#### Дефект І.1.

Виявити такий дефект можна шляхом оцінювання величини електроспоживання на приєднанні комерційного обліку та приєднаннях технічного обліку.

Усунути дефект можливо перевіркою наявності всіх напруг на затискачах лічильників. Дефект може бути або в самому ТН, або в колах вторинної комутації (наприклад, на автоматі 100 В).

**Дефект II.1** може бути змодельований на підставі зібраних облікових даних.

На одному з приєднань 1 секції шин 6 кВ

головної понижувальної підстанції (ГПП) №4 з'явився дефект. На секції шин є лічильник комерційного обліку кл. 0,5 і 4 лічильника технічного обліку класу точності 1,0. Шаблон балансу між КО та ТО за щодобовими даними в травні 2022 року показав, що є небаланс між технічним та комерційним обліком (на 1 секції шин на вводі встановлено лічильник комерційного обліку класу точності 0,5).

В табл. 1 представлені облікові дані в табличному вигляді та дані про значення фактичного приросту небалансу між комерційним та технічним обліком, про приріст навантаження на кожному відхідному приєднанні (для зручності та покращення візуалізації відсутні дані про приріст навантаження на приєднаннях 3, 5, 8).

В стовпчику 10 наведені значення для приросту добового електроспоживання на тому приєднанні, де спостерігався дефект (приєднання 6).

Якщо створити шаблон в програмі «Microsoft Excel», в якому будуть постійно розраховуватися приріст електроспоживання для усіх приєднань технічного обліку та приріст небалансу між комерційним та технічним обліком, то тоді миттєво можна буде визначити приєднання, яке почало працювати з дефектом. В такій ситуації збільшується в однаковій мірі й приріст небалансу між комерційним та технічним обліком, й приріст навантаження на приєднанні з дефектом. В той же час на приєднаннях з нормальною роботою приладів обліку приріст навантаження майже не змінюється.

Таким чином, авторами публікації запропонований основний критерій для визначення приєднання з дефектом обліку – це одночасне збільшення приросту небалансу між комерційним та технічним обліком та приросту навантаження на приєднанні з дефектом.

Доцільно для різних ситуацій мати ще один чи два допоміжних критерія, що будуть також дозволяти визначити приєднання з дефектом обліку.

**Таблиця 1.** Облікові дані по секції шин №1 6 кВ ГПП, де спостерігався дефект приладу обліку II-1

№ з/п	Добове споживання електроенергії на приєднаннях, кВт год				$WP_{\text{ТУ}}$ , кВтг =(2)+ +(3)+ +(4)+ +(5)	$WP_{\text{KV}}$ , кВтг	$НБ=$ =КУ - ТУ, кВтг =(7)- -(6)	$\Delta_1=$ = $НБ_{\text{Г}}$ - $НБ_{\text{В}}$ , кВтг	$\Delta_2=$ = $WP_{\text{I,о}}$ - $WP_{\text{I,в}}$ , кВтг	$K_{\text{кор}}$ ( $\Delta_1/$ $\Delta_2$ )	$K_{\text{кор}}$ (НБ-3)	$K_{\text{кор}}$ (НБ-5)	$K_{\text{кор}}$ (НБ-6)	$K_{\text{кор}}$ (НБ-8)
	Номери приєднання													
	3	5	6	8										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	144	0	640	424	1208	1188	-20							
2	144	0	1168	384	1696	1728	32	53	528		#		1,00	-1,00
3	139	0	1512	457	2108	2124	16	-17	344	1,00	-0,20	#	0,75	-0,37
...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
9	125	0	2464	463	3051	3060	9	-41	592	0,21	-0,26	#	0,33	0,03
10	125	0	<b>280</b>	459	863	2052	<b>1189</b>	<b>1180</b>	<b>-2184</b>	<b>-0,94</b>	-0,41	#	<b>-0,61</b>	0,07

Продовження таблиці 1.

11	134	0	0	471	606	2016	1410	222	-280	-0,94	-0,30	#	-0,76	0,19
12	139	0	0	469	608	2052	1444	34	0	-0,93	-0,17	#	-0,82	0,24
13	82	0	0	471	552	1980	1428	-16	0	-0,93	-0,48	#	-0,85	0,28

Примітки до табл. 1:

1. В стовпчиках 12 і 13 табл. 1 позначка # означає, що не можливо ділити на 0 у формулі для коефіцієнта кореляції. Програма Microsoft Excel дає позначення для цієї ситуації, як «#ДЕЛ/0!».

2. В табл. 1 в стовпчиках 11÷15 наведені ковзні значення коефіцієнту взаємної кореляції для значень небалансу та навантаження (1-2 доби, 1-3, 1-4 доби та так далі).

3. В стовпчику 6 електроспоживання  $WP_{TV}$  на секції (технічний облік) дорівнює сумі електроспоживання усіх приєднань технічного обліку.

4. В стовпчику 7 електроспоживання  $WP_{KV}$  на секції (комерційний облік) розраховується за показниками лічильника комерційного обліку.

5. Фактичний (вимірний) небаланс між комерційним та технічним обліком у кВт годинах наведений в стовпчику 8  $НБ = WP_{KV} - WP_{TV}$ .

6. Приріст фактичного небалансу за і-добу та і-1 добу на секції шин  $\Delta_1 = НБ_i - НБ_{i-1}$  записаний в стовпчику 9.

7. В стовпчику 10 наведено значення приросту електроспоживання приєднання з дефектом в схемі обліку (приєднання 6)  $\Delta_2 = P_{i,d} - P_{i-1,d}$ .

8. Значення коефіцієнту взаємної кореляції  $K_{кор}$  інтервалу приросту фактичного небалансу  $\Delta_1$  й інтервалу приросту електроспоживання приєднання з дефектом в схемі обліку  $\Delta_2$  наведено в стовпчику 11.

9. В стовпчиках 12, 13, 14 та 15 містяться значення коефіцієнту взаємної кореляції фактичного небалансу та електроспоживання на приєднаннях 3, 5, 6, 8 відповідно.

10. Коефіцієнт взаємної кореляції розраховується за формулою:

$$r = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

де  $x_i$  - перша вибірка (фактичний небаланс в кВтгодинах) з середнім значенням  $\bar{x}$ ,  $y_i$  - друга вибірка (електроспоживання на кожному приєднанні в кВтгодинах) з середнім значенням  $\bar{y}$ .

Застосування експериментальних даних, викладених в табл. 1, дозволяє зробити висновок, що критерієм, котрий дозволяє виявити початок

неправильної роботи обліку на секції шин, є небаланс комерційного та технічного обліку електроенергії на одній та тій самій секції шин.

Аналіз табл. 1 показав, що за 10 добу з'явився небаланс, який став значно перевищувати допустимий по секції шин. Причина – різко зменшилося електроспоживання на приєднанні 6, і воно стало дорівнювати 0 за 11, 12, 13 доби внаслідок виходу з ладу лічильника електроенергії. Треба зауважити, що навантаження на приєднанні 6 складає приблизно 70% від усього навантаження секції шин.

Додатковим критерієм, що дає можливість виявити дефект на приєднанні, навантаження якого складає левову частку усього навантаження секції шин, є збільшення по модулю коефіцієнту кореляції Пірсона між небалансом КО та ТО та навантаженням на дефектному приєднанні; між приростом небалансу КО та ТО та приростом навантаження на тому ж дефектному приєднанні.

Значення коефіцієнта взаємної кореляції між небалансом та навантаженням кожного з приєднань підстанції, представлених у балансовому рівнянні, швидко вказує на приєднання, де є дефект в колах обліку. Ця величина на дефектному приєднанні може зростати від 0,2÷0,4 перед проблемою з обліком до 0,8÷0,9 і більше при неправильній роботі приладу обліку, тоді як кореляція інших приєднань зберігається на колишньому низькому рівні. Перехід до "сильної" і "дуже сильної" кореляції вказує на можливе місце генерації спотворень у вимірюванні витрати електроенергії для приєднання, яке було навантажено перед початком неправильної роботи схеми обліку.

Дефекти П.2 та П.3 можуть бути також змодельовані на підставі зібраних облікових даних.

Виникають інколи такі ситуації, коли на приєднанні немає електроспоживання, а потім внаслідок помилки приладу обліку або пристрою збору-передачі даних воно раптово і суттєво збільшується.

Так, на секції шин №4 6 кВ ГПП зібрані облікові дані про щодобове електроспоживання за 21 добу квітня 202... року (табл. 2).

В цій таблиці наведені також окрім вихідних даних приведені значення коефіцієнтів взаємної кореляції значень небалансу та електроспоживання приєднання з дефектом обліку, приросту небалансу.

Таблиця 2. Вихідні дані по секції шин 6 кВ ГПП

№з/п	Приєднання (фідер)			В-5 ТУ	В-5 КУ	НБ= = КУ-ТУ	$\Delta_1 =$ $=$ $НБ_{i+1}$ $-$ $НБ_i$	$K_{кор}$ ( $\Delta_1 /$ $\Delta_2$ )	$K_{кор}$ (НБ-3)	$K_{кор}$ (НБ-4)	$K_{кор}$ (НБ-6)
	3	4	6								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	16003	4	912	16919	16632	-287					
2	15523	0	912	16435	16164	-271	16		-1	-1	#ДЕЛ/0!
3	15274	0	960	16234	15984	-250	22	1,00	-0,96	-0,82	0,91
...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...
17	30451	0	864	31315	30708	-607	-99	-0,90	-0,99	-0,45	0,27
18	30432	0	864	31296	30708	-588	19	-0,90	-0,90	-0,39	0,28
19	29203	1	864	30068	29556	-512	76	-0,90	-0,90	-0,39	0,28
20	29424	0	864	30288	29772	-516	-4	-0,90	-0,90	-0,36	0,29
21	29942	1	912	30855	30240	-615	-99	-0,89	-0,89	-0,36	0,29

Примітка до табл. 2:

1. Позначення стовпчиків 7, 8 та 9 відповідає назві стовпчиків 8, 9 та 10 таблиці 1 відповідно.

2. Позначення стовпчиків 10, 11 та 12 відповідає назві стовпчиків 12, 13 та 14 таблиці 1 відповідно.

Аналіз даних, наведених в табл. 2 показує, що на секції шин є приєднання з найбільшим (приєднання 3), з доволі невеликим (приєднання 6) та з нульовим (приєднання 4) електроспоживанням.

На приєднаннях, де електроспоживання в наявності (приєднання 3 та 6), змодельований в

залежності від облікових даних режим з електроспоживанням в 0%, 25%, 50%, 75%, 150%. Зменшені або збільшені усі значення, наведені в стовпчиках 2 та 4, відносно вихідного електроспоживання (100% до вихідних даних). Визначені критерії, за якими можна знайти приєднання з неправильною роботою приладів обліку. Розрахований критерій Фішера для масиву даних, що складається з фактичного небалансу та електроспоживання на приєднанні (використаний однофакторний дисперсійний аналіз надбудови «Пакет аналіза»). Результати моделювання та розрахунків зведені в табл. 3.

Таблиця 3. Результати моделювання електроспоживання на приєднаннях, на яких воно присутнє

Ознака приєднання	Рівень електроспоживання на приєднанні в відсотках до вихідних облікових даних (100%), %											
	0		25		50		75		100		150	
	$K_{кор}$ (НБ- WP)	$F$ (НБ- WP)	$K_{кор}$ (НБ- WP)	$F$ (НБ- WP)	$K_{кор}$ (НБ- WP)	$F$ (НБ- WP)	$K_{кор}$ (НБ- WP)	$F$ (НБ- WP)	$K_{кор}$ (НБ- WP)	$F$ (НБ- WP)	$K_{кор}$ (НБ- WP)	$F$ (НБ- WP)
Важливе (ф. 3)	#ДЕЛ/0!	41,9	0,999	16,3	0,999	0,03	0,999	18,2	<b>-0,9</b>	<b>43,1</b>	0,999	67,1
Не важливе (ф. 6)	#ДЕЛ/0!	4,2	0,99	0,76	0,97	0,86	0,95	6,78	<b>0,29</b>	<b>12,3</b>	-0,98	16,5

Примітки до табл. 3:

1. Навантаження на приєднанні 3 складає приблизно 90% від усього навантаження секції.

2. Навантаження на приєднанні 6 складає приблизно 10% від усього навантаження секції.

3. Для вибірки в 21 значення табличне значення критерію Фішера для масиву даних, що складається з фактичного небалансу та електроспоживання на приєднанні  $F_{табл.} = 4,08$ .

Таким чином, доведено, що визначення в режимі реального часу та постійно приросту небалансу електроспоживання між комерційним та технічним обліком електроенергії дозволяє оперативно виявити проблему в колах обліку.

Дані табл. 1 та 3 свідчать про те, що критеріями, за якими можна швидко виявити дефектне приєднання, є, по-перше, приріст небалансу на тому

приєднанні технічного обліку електроенергії, де спостерігається дефект; по-друге, це коефіцієнт взаємної кореляції між небалансом електроспоживання та електроспоживанням на яких може бути дефект в схемі або в приладах обліку; втретє, це коефіцієнт взаємної кореляції між приростом небалансу електроспоживання на секції шин та приростом електроспоживання на усіх приєднаннях, під'єднаних до секції шин. Останні два критерії майже рівнозначні. Ці твердження вірні для випадку, коли навантаження збільшується або зменшується відносно початкових достовірних даних.

Дані табл. 3 свідчать, що коефіцієнт Фішера, розрахований для масиву даних, котрий створений

вибірками небалансу КО з ТО та електроспоживанням на дефектному приєднанні, придатний тільки для того, щоби в'яснити, значення електроспоживання при дефекті більше від достовірних значень або менше. Коли електроспоживання більше, то є тісний зв'язок між цими даними.

Інша ситуація, коли на приєднанні технічного обліку(наприклад, приєднання 4 з табл. 2) майже не було зовсім навантаження, а потім воно внаслідок певного дефекту лічильника збільшилося. Така ситуація змодельована для декількох рівнів добового електроспоживання. Розрахунки зведені в табл. 4.

**Таблиця 4.** Результати моделювання електроспоживання на приєднанні, на якому воно було відсутнє

Ознака приєднання	Рівень електроспоживання на приєднанні 4 в кВт годинах									
	≈0		400		800		8000		16000	
	$K_{кор.}$ (НБ- <i>WP</i> )	$F$ (НБ- <i>WP</i> )	$K_{кор.}$ (НБ- <i>WP</i> )	$F$ (НБ- <i>WP</i> )	$K_{кор.}$ (НБ- <i>WP</i> )	$F$ (НБ- <i>WP</i> )	$K_{кор.}$ (НБ- <i>WP</i> )	$F$ (НБ- <i>WP</i> )	$K_{кор.}$ (НБ- <i>WP</i> )	$F$ (НБ- <i>WP</i> )
ф. 4	-0,44	28,0	-0,05	371,0	-0,1	1013,5	-0,7	36158	-0,88	55326

Роблячи аналіз табл. 4, можна зробити висновок, що середній коефіцієнт взаємної кореляції між небалансом та електроспоживанням на приєднанні 4, до певного рівня електроспоживання, не є критерієм, що визначає дефект на приєднанні. Для випадку, коли навантаження на приєднанні майже не було, в якості додаткового критерію треба застосовувати критерій Фішера. Чим більше хибне значення електроспоживання на приєднанні, тим тісніше

зв'язок між небалансом КО та ТО і електроспоживанням на приєднанні.

Значення статистичних величин при моделюванні зникнення навантаження на доволі ненавантаженому приєднанні 6 згідно табл. 2 наведені в табл. 5.

**Таблиця 5.** Значення статистичних величин при моделюванні зникнення навантаження на доволі ненавантаженому приєднанні

№п/п	Приєднання 6	В-5 ТУ	В-5 КУ	$\Delta =$ = КУ-ТУ	$\Delta_1 =$ = НБ <sub>i+1</sub> - НБ <sub>i</sub>	$\Delta_2 =$ = $\frac{P_{i+1\delta} - P_{i\delta}}$	$K_{кор}$ ( $\frac{\Delta_1}{\Delta_2}$ )	$K_{кор}$ (НБ-6)	$F$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	912	16919,2	16632	-287,2					
2	912	16435,2	16164	-271,2	16	0		#ДЕЛ/0!	
3	960	16233,6	15984	-249,6	21,6	48	1,00	0,91	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
17	864	31315,2	30708	-607,2	-98,8	96	-0,27	0,27	8,86
18	0	30432	30708	276	<b>883,2</b>	<b>-864</b>	-0,20	<b>0,18</b>	8,53
19	0	29204,2	29556	351,8	75,8	0	-0,20	0,11	8,18
20	0	29424	29772	348	-3,8	0	-0,20	0,05	7,87
21	912	30855,4	30240	-615,4	-963,4	912	-0,19	0,06	8,46>4,08

На приєднанні 6 змодельована ситуація, коли 3 доби лічильник не рахував електроенергію зовсім, а на четверту лічильник замінили.

Критерієм локалізації дефекту на доволі ненавантаженому приєднанні є приріст електроспоживання на цьому приєднанні.

Коефіцієнт взаємної кореляції  $K_{кор}(НБ-3)$  між небалансом між КО та ТО і електроспоживанням на приєднанні з неправильною роботою приладу обліку в штатному режимі дорівнює  $K_{кор}(НБ-3)=0,27$ , а коли навантаження зникло, то  $K_{кор}(НБ-3)=0,18$ . Цей критерій не є достатньо показним при невеликому навантаженні приєднання.

*Таким чином, при незначному відносно загального навантаження секції шин, коефіцієнт взаємної кореляції між небалансом між КО та ТО і електроспоживанням на приєднанні з неправильною роботою приладу обліку, не є додатковим критерієм визначення дефектного приєднання серед приєднань однієї тієї самої секції шин.*

Доцільно розраховувати погодинний небаланс по кожній секції лінії 6, 10 або 110 кВ головних понижуючих підстанцій та розподільних пунктів з урахуванням кількості та класів точності приладів обліку комерційного обліку та технічного обліку.

Перспективним напрямком в забезпеченні верифікації облікових даних є встановлення заздалегідь меж, в яких може коливатися електроспоживання різних приєднань.

Є наступні поширені види приєднань: приєднання вводу на тупикову розподільну підстанцію, приєднання понижуючого трансформатора напругою 35(10) (6)/0,4 кВ, приєднання електродвигуна напругою понад 1 кВ.

Необхідно пам'ятати про те, що електроспоживання на ввіді тупикової підстанції повинно бути більше електроспоживання будь-якого з відхідних приєднань. Краще межі задавати шляхом знаходження мінімального та максимального значення шляхом перегляду ретроспективних даних за попередній рік (місяць). При роботі автоматичного включення резервного живлення (АВР) навантаження з однієї секції може лягти на другу, що теж треба при цьому враховувати.

Електроспоживання на приєднанні електродвигуна не може бути більше, ніж 105% за номінальну його потужність, та менше 5% від його номінальної потужності.

Приєднання силового трансформатора повинно мати межі достовірних значень від втрат неробочого ходу до 120% номінальної потужності силового трансформатора з урахуванням того, що якщо два однакових трансформатора можуть працюють паралельно, то при відключенні одного усе навантаження лягає на другий.

Строки усунення дефектів у вимірювальних комплексах при застосуванні щодобових даних та критеріїв, запропонованих авторами публікації, можуть бути скорочені до 2 діб від моменту виникнення несправності. Якщо на підприємстві

працює АСОЕ, яка дозволяє використовувати щогодинні дані, то в такому випадку неправильна робота обліку електроенергії на якомусь вимірювальному каналі не може перевищувати декількох годин.

Дослідження різнопланових дефектів на приєднаннях технічного обліку дозволяють запропонувати наступну послідовність виявлення дефекту в колах обліку:

1. Організація автоматизованого обліку на комерційному та технічному обліку.

2. Встановлення заздалегідь меж, в яких може коливатися електроспоживання на кожному приєднанні

3. Впровадження розрахунку фактичного та допустимого небалансів між комерційним та технічним обліком по щодобовим або щогодинним даним.

4. Розрахунок одночасно в тій самій звітній формі, де розраховуються небаланси, приросту небалансу між комерційним та технічним обліком та приросту навантаження на кожному приєднанні технічного обліку, коефіцієнтів кореляції Пірсона між небалансом комерційного та технічного обліку та навантаженням на кожному приєднанні (або між приростом небалансу КО та ТО та приростом навантаження на кожному приєднанні), критерію Фішера F вибірок небалансу між КО та ТО і навантаженням на кожному приєднанні.

5. Визначення по знаку небалансу виду дефекту обліку.

6. Одночасне збільшення приросту небалансу між комерційним та технічним обліком та приросту навантаження на приєднанні означає, що на цьому приєднанні є дефект. Це основний критерій виявлення приєднання з дефектом обліку.

7. Дефект на приєднанні, навантаження якого складає ліву частку усього навантаження секції шин, можна виявити також збільшенням по модулю коефіцієнтів кореляції Пірсона між небалансом комерційного та технічного обліку та навантаженням на цьому приєднанні. Це додатковий критерій.

8. Для випадку, коли навантаження на якомусь приєднанні майже не було, а потім виникло неіснуюче навантаження, доцільно в якості додаткового критерію застосовувати критерій Фішера вибірок небалансу між комерційним та технічним обліком та навантаженням на цьому приєднанні.

9. Направлення кваліфікованого навченого електротехнічного персоналу для заміни приладу чи пристрою обліку (або усунення дефекту в колах вторинної комутації) на визначеному приєднанні.

## V. ВИСНОВКИ

1. Запропонований поділ дефектів в колах обліку



на чотири види, а саме: відсутність однієї фази вторинної напруги 100 В на затискачах лічильників у трипровідних мережах або двох фаз у чотирихпровідних на усіх приєднаннях як комерційного, так і технічного обліку; електроспоживання на якомусь приєднанні дорівнює 0 внаслідок відсутності напруги на усіх фазах лічильника або виходу з ладу лічильника; зменшення електроспоживання внаслідок відсутності однієї фази по струму або по нарузі; електроспоживання комерційного обліку менше за електроспоживання технічного з-за неправильної роботи приладу обліку або пристрою збору-передачі даних, що спричиняє збільшення електроспоживання на приєднанні технічного обліку.

2. Критерієм, котрий дозволяє виявити початок неправильної роботи обліку на секції шин, є небаланс комерційного та технічного обліку електроенергії на тій самій секції шин.

3. Основним критерієм для визначення приєднання з дефектом обліку визначено одночасне збільшення приросту небалансу між комерційним та технічним обліком та приросту навантаження на приєднанні з дефектом.

4. Додатковим критерієм, що дає можливість виявити дефект на приєднанні, навантаження якого складає левову частку усього навантаження секції шин, є збільшення по модулю коефіцієнтів кореляції Пірсона між небалансом комерційного та технічного обліку та навантаженням на дефектному приєднанні або між приростом небалансу КО та ТО та приростом навантаження на тому ж дефектному приєднанні.

5. Для випадку, коли навантаження на якомусь приєднанні майже не було, а потім виникло неіснуюче навантаження в якості додаткового критерію доцільно застосовувати критерій Фішера вибірок небалансу між комерційним та технічним обліком та навантаженням на цьому приєднанні.

6. Розроблена послідовність виявлення дефекту в колах обліку на секції шин підстанції, де усі приєднання охоплені комерційним або технічним обліком.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Додаток 10 до Договору між членами Оптового ринку електричної енергії України. Інструкція про порядок комерційного обліку електричної енергії. К., 2013.
- [2] Лук'яненко І. Г. Економетрика: Підручник / І. Г. Лук'яненко, Л. І. Краснікова // К.: Товариство «Знання», КОО. – 1998. – 494 с.
- [3] Д. А. Гапон, О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, Н. В. Рудевіч, «Автоматизовані системи обліку і якості

електроенергії у системах електропостачання», Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, вип. 2 (3), с. 54-58, Груд. 2021.

- [4] Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії : монографія / А. В. Праховник, Ю. Ф. Тесик, А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, О. Г. Гриб, В. П. Калінчик, О. Л. Карасінський, О. М. Довгалюк, О. П. Лазуренко, А. М. Хадаківський, В. І. Васильченко, О. Д. Светелік ; ред. О. Г. Гриб. – Харків : Ранок-НТ, 2012. – 516 с.
- [5] Гутаренко В. П., Коваль С. А. Облік і контроль електроенергії на промислових підприємствах. – Київ: Техніка, 2018. – 220 с.
- [6] Сидоренко М. І. Моніторинг енергоспоживання в електроустановках промислових об'єктів. – Харків: Основа, 2019. – 180 с.
- [7] Петренко А. М., Тарасов В. І. «Аналіз методів виявлення дефектів обліку енергії». Енергетика України, 2020, №2, с. 34-40.
- [8] Коршунов В. О. «Критерії оцінки небалансів в енергосистемах». Наукові записки з енергетики, 2021, т. 12, №3, с. 55-60.
- [9] Zhang, X., Li, H., & Wang, Y. «Electricity consumption monitoring and fraud detection using IoT technologies». IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3), pp. 1234-1242.
- [10] Кучеренко С. Г. «Застосування кореляційного аналізу для виявлення аномалій в енергоспоживанні». Електротехніка і автоматика, 2020, №1, с. 67-72.
- [11] Schneider Electric White Paper. «Energy monitoring and anomaly detection in industrial power systems». – Schneider Electric, 2021.
- [12] Поляков Д. М. «Розвиток технологій енергетичного моніторингу». Енергетика і автоматизація, 2021, №4, с. 88-94.
- [13] ABB Group. «Automated solutions for energy loss detection». – ABB Technical Publications, 2021.
- [14] Kumar, R., & Singh, J. «Advanced metering infrastructure in modern power grids». Energy Reports, 2021, 7, pp. 1123-1130.
- [15] Енергетичний форум України. «Сучасні виклики в обліку енергії». – Матеріали конференції, 2022.
- [16] Kwon, J., & Lee, K. «Big Data analytics for anomaly detection in energy systems». Energy Systems Research, 2021, 15(3), pp. 65-78.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2024

## METHOD FOR IDENTIFYING A CONNECTION WITH A METERING DEFECT AMONG MULTIPLE CONNECTIONS ON A SINGLE BUSBAR SECTION

- VOLOSHKO A.V. Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, e-mail: avolosko820@gmail.com, ORCID 0000-0002-6857-2060;
- BEDERAK Y.S. Candidate of Technical Sciences, Private Joint Stock Company "AZOT", Cherkasy, Ukraine, e-mail: yaroslav0768@gmail.com, ORCID 0000-0002-2669-0965;
- KOZLOVSKIY Y.V. PhD student, Group GE-41f, IEE, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, e-mail: eugene.kozlovskiy@gmail.com, ORCID 0009-0009-2753-3900;

**Purpose.** The purpose of this work is to develop a methodology for identifying a defective connection on a single medium- or low-voltage busbar section among several parallel connections.

**Methodology.** As is known, from three to two dozen connections can be powered simultaneously from the busbar section of the main step-down substation with a higher voltage of 35÷154 kV, a dead-end substation with a medium voltage of 10 (6) kV or a transformer substation with a voltage of 10 (6)/0.4 kV. A metering device defect on one of these connections can only be detected using the balance method (where a metering device, usually for commercial purposes, is installed at the busbar section input, and each outgoing connection from the busbar section is also equipped with an electricity meter). The search for a defective metering device is carried out by inspecting all metering devices for each connection. Among them, the defective device is identified. However, this procedure often takes a significant amount of time, requires the implementation of organizational and technical measures when working in operational electrical installations, and can lead to emergency disconnections of connections due to voltage circuit shorting or current circuit breaking caused by incorrect or erroneous actions of personnel.

**Findings.** Four main types of defects in accounting schemes are identified. It is shown that the imbalance between commercial and technical accounting can be used to identify defects in the tire section. Criteria for the rapid identification of defective connections based on statistical methods such as correlation analysis and one-factor analysis of variance are developed.

**Originality.** In contrast to the existing approach, the sequence is proposed and the criteria for finding a connection with a metering defect are developed using the analytical method. As a result, it will be necessary to replace the metering device or device only at one connection connected to the busbar section with a defect in the metering circuits. The analytical method is based on the processing of metering data and the calculation of several statistical coefficients.

**Practical value.** The proposed methodology enables the rapid identification of a defective metering device using an analytical method. It ensures fast and accurate detection of defective connections on the busbar section, helping to avoid emergency situations and energy losses. This makes the methodology valuable for industrial enterprises with high energy consumption.

**Keywords:** electricity metering; electricity meter; balance method; imbalance increase; mutual correlation coefficient; Fisher's criterion.

### REFERENCES

- [1] Appendix 10 to the Agreement between the members of the Wholesale Electricity Market of Ukraine. Instruction on the Procedure for Commercial Electricity Metering. Kyiv, 2013.
- [2] Lukyanenko, I. G., Krasnikova., L. I. (1998). Economics: Textbook. Kyiv: Knowledge Society, KOO, 494.
- [3] Gapon, D. A., Hryb, O. H., Karpaliuk, I. T., Rudevich, N. V. (2021). Automated systems for metering and quality control of electricity in power supply systems, Visn. Nat. Tech. Univ. "KhPI." Ser.: Power Engineering: Reliability and Energy Efficiency, No. 2(3), 54–58.
- [4] Prakhovnyk A. V., Tesyk Yu. F., Zharkin A. F., Novskiy V. O., Hryb O. H, Kalinchyk V. P., Karasynskiy O. L., Dovhaliuk O. M., Lazurenko O. P., Khadakovskiy A. M., Vasylenko V. I., Svetelik O. D., Hryb O. H.(2012). Automated systems for metering and quality control of electricity: Monograph. Kharkiv: Ranok-NT, 516.
- [5] Hutaranko, V. P., Koval, S. A. (2018). Electricity metering and control in industrial enterprises. Kyiv: Tekhnika, 220.
- [6] Sydorenko, M. I. (2019). Energy consumption moni-

- toring in industrial electrical installations. Kharkiv: Osnova, 180.
- [7] Petrenko, A. M., Tarasov, V. I. (2020). Analysis of energy metering defect detection methods. *Energetyka Ukrainy*, No. 2, 34–40.
- [8] Korshunov, V. O. (2021). Criteria for assessing imbalances in power systems. *Scientific Notes on Energy*. Vol. 12, No. 3, 55–60.
- [9] Zhang, X., Li, H., Wang, Y. (2019). Electricity consumption monitoring and fraud detection using IoT technologies. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 10, No. 3, 1234–1242.
- [10] Kucherenko, S. H. (2020). Application of correlation analysis for detecting anomalies in energy consumption. *Electrical Engineering and Automation*. No. 1, 67–72.
- [11] Schneider Electric White Paper. (2021). Energy monitoring and anomaly detection in industrial power systems. Schneider Electric.
- [12] Polyakov, D. M. (2021). Development of energy monitoring technologies. *Energy and Automation*. No. 4, 88–94.
- [13] ABB Group. (2021). Automated solutions for energy loss detection. ABB Technical Publications.
- [14] Kumar, R., Singh, J. (2021). Advanced metering infrastructure in modern power grids. *Energy Reports*, Vol. 7, 1123–1130.
- [15] Ukrainian Energy Forum. (2022). Modern challenges in energy metering. Conference proceedings.
- [16] Kwon, J., Lee, K. (2021). Big Data analytics for anomaly detection in energy systems. *Energy Systems Research*. Vol. 15, No. 3, 65–78.

УДК. 62-50

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ ПІД ЧАС МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА ЕЛЕВАТОРА

МАРДЗЯВКО В.А. асистент, Миколаївський національний аграрний університет, Миколаїв, Україна,  
e-mail: vitalijmardzavko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7327-9215;

РУДЕНКО А.Ю. асистент, Миколаївський національний аграрний університет, Миколаїв, Україна,  
e-mail: andrey0911r@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5103-6412;

**Мета роботи.** Метою даної роботи є створення математичної моделі та обґрунтування алгоритму для мінімізації енергоспоживання під час транспортування зерна в елеваторному комплексі шляхом оптимізації маршруту транспортування.

**Методи дослідження.** Був застосований аналітичний метод дослідження для вивчення існуючих підходів до оптимізації маршрутів та алгоритмів мінімізації енергоспоживання. Застосовано математичний метод для формалізації задачі мінімізації енергоспоживання в елеваторному комплексі. Використано алгоритмічний метод для розробки та адаптації алгоритмів, таких як задача комівояжера, до специфіки транспортування зерна.

**Отримані результати.** Отримані результати показали, що впровадження алгоритму оптимізації маршруту транспортування зерна на основі критерію мінімізації енергоспоживання дозволяє значно знизити загальні енерговитрати елеваторного комплексу. Розроблена математична модель і алгоритм на основі задачі Комівояжера дозволяє описати та пояснити забезпечення ефективного вибору маршруту, що проходить через усі необхідні вузли лише один раз, з мінімальними енергетичними витратами. Система логічних рівнянь, що враховує стан вузлів, перевантаження, швидкість і напрямок руху, забезпечить свою ефективність у зниженні споживання енергії.

**Наукова новина.** Наукова новизна роботи полягає у розробці алгоритму вибору оптимального маршруту транспортування зерна на основі мінімізації енергоспоживання, що інтегрує математичну модель задачі комівояжера з умовами Міллера-Таккера-Земліна для виключення підциклів. Вперше запропоновано систему логічних рівнянь, яка враховує стан вузлів, напрямок руху, швидкість та відсутність перевантаження. Алгоритм також оптимізує час транспортування, що забезпечує підвищення енергоефективності та продуктивності автоматизованих елеваторних систем.

**Практична цінність.** Практична цінність дослідження полягає у можливості впровадження розробленого алгоритму в автоматизовані системи управління елеваторними комплексами для підвищення енергоефективності та оптимізації роботи. Запропонована методика дозволяє автоматично вибирати маршрути з мінімальним енергоспоживанням, враховуючи технічні характеристики обладнання та умови експлуатації. Це сприяє зниженню загальних витрат електроенергії, підвищенню продуктивності та надійності системи, забезпечуючи економічну вигоду та стабільну роботу транспортної інфраструктури.

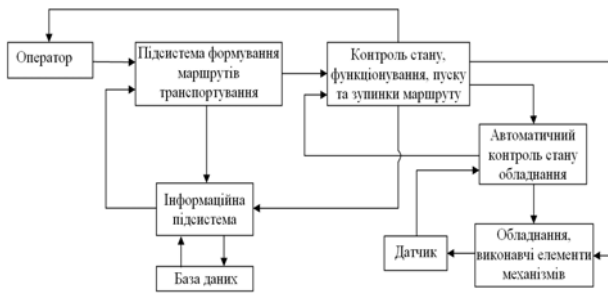
**Ключові слова:** оптимізація енергоспоживання, алгоритм маршрутизації, елеваторний комплекс, програмно-логічний контролер, задача комівояжера, математична модель, автоматизація, енергоефективність, логічні рівняння, транспортна система.

### I. ВСТУП

У сучасних умовах ефективне використання енергоресурсів є одним із ключових аспектів оптимізації роботи зернопереробних комплексів, зокрема елеваторів. Технологічний процес транспортування зерна відзначається значною енергоємністю, оскільки включає в себе взаємопов'язані операції переміщення, обробки та зберігання зернових культур. Проаналізувавши методи прокладання маршрутів і процес управління ними [1] - [5], можна відзначити, що увага майже не приділялася якості цих маршрутів з точки зору їх ефективності, продуктивності, економічної доцільності та логістики, а також їхнього впливу на транспортувальне обладнання. Вивчаючи автоматизовану систему управління елеваторами (рис. 1) [6], яка

охоплює численні функції для підтримки технологічного процесу, варто зауважити, що завдання оптимізації маршруту транспортування зерна в ній реалізоване недостатньо. Це, у свою чергу, призводить до втрат як в економічному, так і в якісному аспектах виробництва.

Сучасні підходи до раціональної організації транспортування зернової продукції на елеваторних комплексах базуються на використанні промислових контролерів, що сумісні з персональними комп'ютерами, електронно-обчислювальними машинами та програмним забезпеченням, які разом формують автоматизовану систему управління технологічними процесами [7].



**Рисунок 1.** Внутрішня структура автоматизованої системи елеваторного комплексу

Програмно - логічний контролер (ПЛК) є ключовим компонентом автоматизації елеваторної системи, оскільки виконує основні функції з управління та захисту обладнання. Алгоритми управління реалізуються через систему логічних рівнянь, що генерують керуючі сигнали для виконавчих механізмів [2] - [8] - [9].

$$\begin{cases} Y_1 = X_7 \& X_6 \& X_5 \& X_3 \& (X_1 \& X_2 \& X_4 + \bar{X}_1 + X_1 \& \bar{X}_2) \\ Y_2 = X_7 \& X_6 \& X_5 \& \bar{X}_3 \& (X_1 \& X_2 \& X_4 + \bar{X}_1 + X_1 \& \bar{X}_2) \end{cases}, (1)$$

де  $X_1, X_2$  - контроль потокового стану об'єкта,  $X_3$  - задано напрямку руху вперед,  $X_4$  - швидкість руху задовільна,  $X_5$  - рух відповідає заданому напрямку,  $X_6$  - перевантаження механізму,  $X_7$  - готовність наступного пристрою до прийому,  $X_8$  - живлення,  $Y_1$  - рух уперед,  $Y_2$  - рух назад.

Згідно із зазначеними рівняннями, можна стверджувати, що ключовим елементом у забезпеченні процесу управління є сигнал, сформований на основі алгоритму управління та логічних рівнянь. Таким чином, побудова маршруту безпосередньо залежить від точно сформованих систем логічних рівнянь, які визначають алгоритм прокладання та функціонування маршруту.

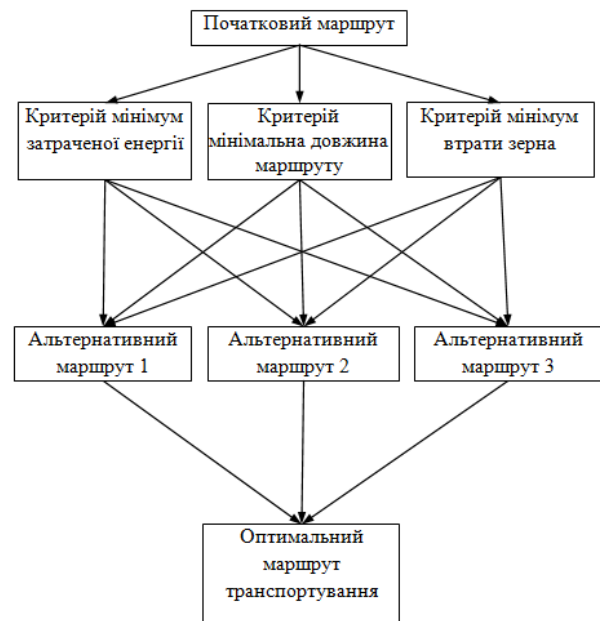
## II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналізуючи автоматизований процес прокладання маршруту [4], [5], [7], [10] - [14], можна відзначити, що транспортування здійснюється через автоматичний вибір із бази даних першого доступного маршруту, запрограмованого інженером заздалегідь, без урахування специфічних вимог або умов. Оператор також може самостійно обирати маршрут зі списку стандартних варіантів або сформувати його вручну - крок за кроком, пристрій за пристроєм. Це, однак, підвищує ймовірність помилок, що призводить до виробничих і економічних втрат. Оскільки жоден із обраних або збудованих маршрутів не враховує певні умови та вимоги для поліпшення показників, важливо, щоб ці вимоги визначалися через критерії оптимізації.

Нинішні алгоритми побудови маршрутів транспортування не оптимальні для технологічного

процесу, оскільки не враховують критерії, які могли б удосконалити транспортування. Відсутність таких критеріїв означає, що програмування маршрутів виконується без уваги до енерговитрат, якості продукції, швидкості транспортування, зношеності обладнання тощо. Тому для досягнення оптимального маршруту транспортування необхідно впровадити відповідні критерії оптимізації.

На рис. 2 [6] показано, як оптимізаційний маршрут залежить від обраного критерію оптимізації, що допомагає вибрати відповідний маршрут транспортування.



**Рисунок 2.** Схема взаємозв'язків між критеріями оптимізації та побудовою альтернативних маршрутів транспортування [6]

Отже, завдяки використанню критеріїв оптимізації, система здатна обирати більш ефективний маршрут із числа запрограмованих варіантів. Змінюючи критерії, можна прокладати альтернативні маршрути, що відрізняються від стандартних, і таким чином досягати більшої гнучкості без додаткових витрат.

Як приклад можна розглянути генерацію прибутку елеватора, для якої важливо забезпечити експортну якість зерна. З цією метою часто доводиться штучно змішувати різні партії, що можливо завдяки альтернативним маршрутам транспортування. Крім того, зерно, призначене для експорту, має відповідати вищим вимогам, і в такому разі застосування критеріїв мінімізації втрат зерна та скорочення часу транспортування дозволить прокласти маршрут, який знизить коефіцієнт пошкодження, покращуючи якість продукції.

При аналізі технологічного процесу (рис. 2) можна відзначити, що одним із критеріїв оптимізації, який забезпечує енергоефективність роботи зернопереробних і зернозберігаючих комплексів, є мінімізація витрат електроенергії під час транспортування (споживання електроенергії на маршруті).

### III. ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ РОБОТИ

Метою даної роботи є створення математичної моделі та обґрунтування алгоритму для мінімізації енергоспоживання під час транспортування зерна в елеваторному комплексі шляхом оптимізації маршруту транспортування.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Впровадження критерію мінімізації витрат електроенергії до програмно-логічного контролера автоматизованої системи дозволить визначити доступні на даний момент маршрути для переміщення зерна від вихідної до кінцевої точки. З цих маршрутів, використовуючи принцип оптимальності та з урахуванням потужності приводів транспортного обладнання, буде обрано або побудовано новий оптимальний маршрут транспортування. Для виконання умов оптимізації контролер видаватиме команди з вихідних затискачів на підготовку електроприводів, клапанів і засувок, що входять до складу технологічного обладнання. Після подачі команди система автоматично запускає лінію, забезпечуючи її роботу з урахуванням програмно-логічних технологічних блокувань та мінімізуючи витрати електроенергії.

Енергоємність комплексу транспортно-технологічних операцій обладнання визначається загальною кількістю енергії, що витрачається на виконання взаємопов'язаних транспортних та технологічних операцій. Таким чином, критерій оптимальності - мінімізація електроспоживання маршруту - можна охарактеризувати як суму потужностей електроприводів технологічних установок, а також приводів клапанів та засувок, що виконують технологічну операцію:

$$C_{e.min} = \sum P_{e.дв.} k_n + \sum P_{e.кл.} k_n + \sum P_{e.зас.} k_n, \quad (2)$$

де  $\sum P_{e.дв.}$  - сума споживаної потужності електроприводів;  $\sum P_{e.кл.}$ ,  $\sum P_{e.зас.}$  - сума споживаної потужності задіяних приводів клапанів та засувок відповідно;  $k$  - коефіцієнт, який характеризує задіяність елемента в процесі маршрутизації ( $k = 0$  - елемент використовується для транспортування,  $k = 1$  - елемент не використовується для транспортування).

Застосування цього критерію при розробці основного або альтернативного маршруту транспортування може сприяти підвищенню енергоефективності технологічного процесу в елеваторному комплексі, що в свою чергу створює

потребу в удосконаленні процесу маршрутизації транспортування.

Алгоритм вибору маршруту на основі критерію мінімізації енерговитрат представлено на рис. 3.

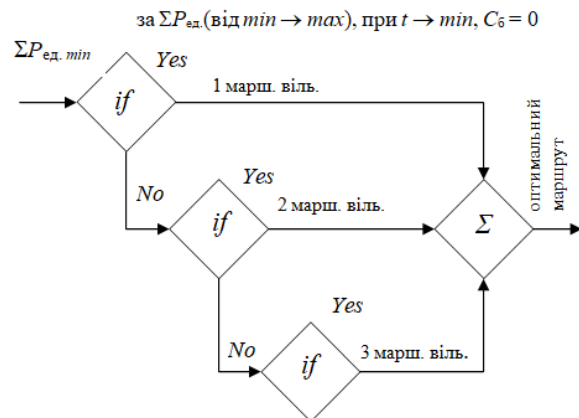


Рисунок 3. Алгоритм вибору прокладання маршруту за критерієм  $min$  енерговитрат

Згідно з цим алгоритмом, маршрут транспортування прокладатиметься від мінімального до максимального значення, залежно від загальної потужності електроприводів усіх задіяних технологічних установок.

Для розрахунку енерговитрат використовують як прості формули (на основі потужності і часу роботи), так і складні математичні моделі. Усе це інтегрується в алгоритми автоматизованої системи управління, що дозволяє мінімізувати витрати електроенергії на транспортування зерна. Іншими словами, система вибиратиме маршрут для транспортування зерна, орієнтуючись на результати умовної оптимізації та перевіряючи доступність кожного маршруту, якщо маршрут вільний, він буде обраний на основі суми потужностей його складових елементів. Ефективність електроприводів враховується через показники ККД, частотне регулювання, контроль перевантажень.

Таким чином, алгоритм дозволяє системі не лише вибирати з наявних маршрутів, а й формувати новий маршрут, спираючись на дані умовної оптимізації та технічні характеристики електротехнічного обладнання, задіяного в процесі транспортування. До таких даних належать призначення транспортних компонентів, їх роль у переміщенні та потужність.

Впровадження цього критерію додає ще одну умову транспортування - мінімізацію часу, що дозволяє знизити енергоспоживання та водночас забезпечити оптимальну тривалість маршруту і кількість залучених установок. Це позитивно впливає на швидкість транспортування, проте при цьому не враховуються можливі втрати зернової продукції.

Алгоритм, представлений на рис. 3, можна описати математично, виходячи із завдання

мінімізації енергоспоживання під час вибору маршруту.

Завдання оптимізації полягає в мінімізації сумарного енергоспоживання, позначеного як  $\Sigma P_{e.m.}$ , де  $P_{e.m.}$  - енергоспоживання механізмів, що матиме вигляд:

$$\min \Sigma P_{e.m.}, \quad (3)$$

при  $C_6 = 0$  умові нульового впливу навантаження від зерна.

Умови вибору заданого алгоритму передбачає вибір між трьома варіантами в залежності від кількості доступних "вільних механізмів". На кожному етапі перевіряються такі умови:

- якщо доступний 1 вільний механізм: якщо умова виконується, використовується 1 механізм, перехід на наступний етап підсумовування.
- якщо немає вільного механізму першому етапі, перевіряється можливість використання 2 вільних механізмів: якщо так, то використовуються 2 механізми, перехід на етап підсумовування.
- якщо обидві попередні умови не виконуються, перевіряється можливість використання 3 вільних механізмів: якщо так, то використовуються 3 механізми, перехід на етап підсумовування.

На кожному етапі підсумовується загальне енергоспоживання доступних механізмів. Оптимальний маршрут вибирається, виходячи з найменшого значення  $\Sigma P_{e.m.}$ , що є рішенням завдання, отже, математично процес вибору маршруту можна записати так:

$$\text{Мінімізація: } \Sigma P_{e.m.}(t) \rightarrow \min, \quad (4)$$

де підсумовуються енерговитрати механізмів кожного можливого маршруту, а кількість механізмів визначається умовами алгоритму.

Такий підхід до вибору маршруту мінімізує загальні енерговитрати системи, виходячи з перевірки доступних ресурсів (вільних механізмів) кожному етапі.

Для побудови математичної моделі маршруту з мінімізацією енергоспоживання виходячи з представленого математично опису виконає побудову математична модель задачі мінімізації енергоспоживання при виборі маршруту.

Залежно від доступних вільних механізмів кожної ділянки, використовуються різні механізми, це можна записати як набір умов:

$$\sum_{m=1}^3 N_m \leq \max \text{кількість механізмів}, \quad (5)$$

де  $N_m$  - число механізмів, що використовуються для проходження ділянки, наприклад: якщо доступний 1 вільний механізм, використовується його енергоспоживання  $C_{ij1}$ ; якщо є 2 вільні механізми, вибирається мінімальна сума їх енергоспоживання  $C_{ij2}$ ; якщо 3 механізми, то мінімізується сума  $C_{ij3}$ .

Звідси енергоспоживання на ділянці маршруту між пунктами  $i$  та  $j$ , можна записати у вигляді:

$$P_{ij} = \begin{cases} C_{ij1}, \text{ якщо використовується 1 механізм} \\ C_{ij2}, \text{ якщо використовується 2 механізм} \\ C_{ij3}, \text{ якщо використовується 3 механізм} \end{cases}, \quad (6)$$

де  $i, j \in V$  - безліч вузлів маршруту.

Обмеження на вибір маршруту передбачає, що маршрут має бути замкнутим (для завдань, пов'язаних з циклічною маршрутизацією, наприклад, у транспортних системах) або повинен починатися з початкової точки і завершуватися в кінцевій:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \text{ (вхід до вузла)}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \text{ (вихід з вузла)}, \quad (8)$$

Ці умови гарантують, що маршрут проходить через усі необхідні точки.

Умова цілісності вимагає, щоб змінні  $x_{ij}$  були бінарними, тобто приймали лише значення 0 або 1.

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (9)$$

Отже, повна математична модель задачі мінімізації енергоспоживання при виборі маршруту виглядає так:

$$P_{e.o.\min} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} x_{ij}, \quad (10)$$

за умов:

1) обмеження кількості вільних механізмів:

$$\sum_{m=1}^3 N_m \leq \max \text{кількість механізмів},$$

та вибір відповідного механізму:

$$P_{ij} = \begin{cases} C_{ij1}, \text{ якщо використовується 1 механізм} \\ C_{ij2}, \text{ якщо використовується 2 механізм} \\ C_{ij3}, \text{ якщо використовується 3 механізм} \end{cases},$$

2) обмеження на вибір маршруту:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j, \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i,$$

3) умова цілісності:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

Ця модель дозволить вибрати маршрут, який мінімізує енерговитрати на підставі наявності вільних механізмів та витрат на кожній ділянці колії.

Для вирішення описаної математичної моделі мінімізації енергоспоживання при виборі маршруту

можна скористатися алгоритмами для вирішення задачі комівояжера.

Завдання комівояжера (TSP - Traveling Salesman Problem) [15] при виборі маршруту може бути використана, якщо потрібно знайти маршрут, який проходить через всі вузли рівно один раз з мінімальними енерговитратами, і при цьому можна використовувати різні механізми, що впливають на енергоспоживання.

Адаптація методу комівояжера для застосування в транспортних процесах елеваторного комплексу зображено на рис. 4.

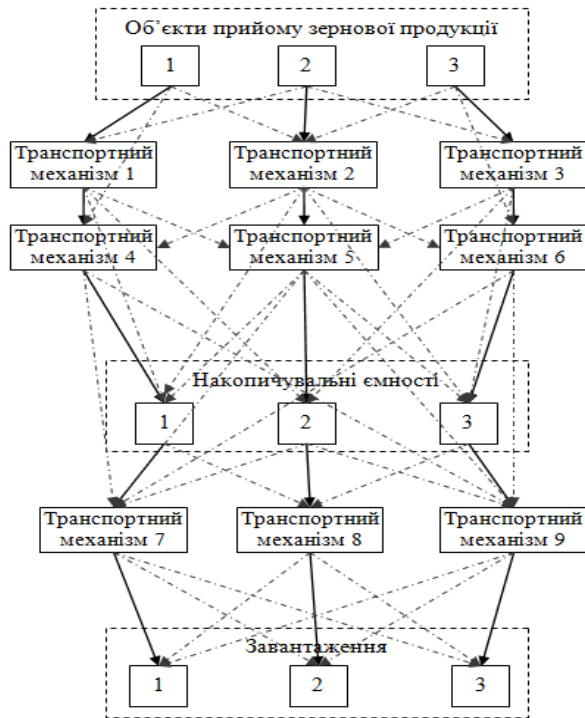


Рисунок 4. Технологічної схеми транспортування зерна за задачею Комівояжера

При математичному формуванні моделі мінімізації сумарного енергоспоживання для завдання комівояжера, нехай  $G=(V, E)$  є повним графом, де  $V$  - множина вузлів транспортного маршруту  $V = \{0,1,\dots,n-1\}$ , а  $E$  - множина ребер, що з'єднують ці вузли. Нехай  $P_{ij}$  визначає енергоспоживання на відрізку маршруту між вузлами  $i$  та  $j$ , де необхідно знайти цикл транспортування, який мінімізує загальні витрати енергії. Отже цільова функція матиме вигляд:

$$P_{e.d.min} = \min \sum_{(i,j) \in E} P_{ij} x_{ij}, \quad (11)$$

де  $x_{ij} \in \{0,1\}$  - бінарна змінна, що дорівнює 1, якщо маршрут проходить через ребро  $(i, j)$ , та 0 - в інших випадках;  $P_{ij}$  - енерговитрати на переміщення між вузлами  $i$  та  $j$ , де  $i, j \in V$  та  $P_{ij} \geq 0$  для всіх  $i \neq j$ ,  $P_{ij} = 0$ .

Обмеження для даної цільової функції, виходять з формування задачі, що кожен вузол відвідується рівно один раз:

$$\sum_{i=0, j \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V, \quad \sum_{i=0, j \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V, \quad (12)$$

Ці обмеження гарантують, що кожен вузол має рівно одне ребро, що входить і одне ребро, що виходить із нього.

Для усунення підциклів використовується допоміжна змінна  $u_i$ , яка визначає позицію вузла  $i$  у маршруті транспортування. Обмеження, спрямовані на виключення підциклів, мають такий вигляд:

$$u_i - u_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1 \quad \forall i \neq 0, j \neq 0, \quad (13)$$

$$1 \leq u_i \leq n - 1 \quad \forall i \in V, i \neq 0, \quad (14)$$

де  $u_i$  - допоміжна змінна для усунення підциклів (під-модель Міллера-Таккера-Земліна).

Ці обмеження забезпечують, що маршрут є єдиний цикл, а чи не безліч підциклів.

Бінарні змінні:

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, \quad (15)$$

В результаті математична модель для визначення мінімізації енергоспоживання за задачею Комівояжера матиме вигляд:

$$P_{e.d.min} = \min \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} P_{ij} x_{ij}, \quad (16)$$

Модель (12-16) спрямована на мінімізацію загальних енерговитрат по всіх ребрах маршруту, тоді як обмеження 1 і 2 забезпечують відвідування кожного вузла рівно один раз. Умови Міллера-Таккера-Земліна [16] (обмеження 3) усувають можливість підциклів, гарантуючи формування єдиного замкнутого циклу для маршруту.

Отже, сформульована модель являє собою завдання цілісного лінійного програмування з бінарними змінними для мінімізації сумарних енерговитрат у задачі Комівояжера. Вона може бути вирішена за допомогою стандартних методів оптимізації, таких як симплекс-метод з цілим розширенням.

На основі сформульованої моделі, виконаємо побудову системи логічних рівнянь які б забезпечували мінімізацію сумарного енергоспоживання в процесі транспортування зернової маси в елеваторному комплексі. Для формулювання системи логічних рівнянь мінімізації сумарного енергоспоживання для маршрутизації елеватора, необхідно врахувати потоки зерна між вузлами, а також витрати енергії на кожному етапі. Як було зазначено раніше, логічні рівняння описуватимуть умови, при яких механізм елеватора переміщує зернову масу, і будуть засновані на поточному стані системи та заданих параметрах.

Основними елементами задачі є: енергоспоживання  $P_{ij}$  - кількість енергії, необхідної для переміщення зерна між вузлами  $i$  та  $j$ ; вузли транспортної



системи:  $N_1, N_2, \dots, N_n$  - кожен вузол може бути перевалочною точкою або кінцевим пунктом для переміщення зерна; бінарні змінні  $x_{ij} \in \{0,1\}$  змінні, що визначають наявність або відсутність переміщення зерна між вузлами  $i$  та  $j$ ; додаткові змінні для контролю стану елеватора: контроль перевантаження, готовність до прийому, швидкість переміщення і т.д.

Також до основних елементів системи логічних рівнянь необхідно віднести логічні змінні, під час виконання процесу транспортування:  $X_1, X_2, \dots, X_n$  - стан вузлів (наприклад, готовність до прийому зерна, чи є місце для наступної порції зерна);  $X_3$  - напрямок руху матеріалу (вперед або назад по системі);  $X_4$  - швидкість переміщення задовільна;  $X_5$  - перевантаження механізму;  $X_6$  - готовність наступного вузла до прийому;  $X_7$  - живлення активне.

Як і в попередньому випадку, для побудови логічних рівнянь для мінімізації енергоспоживання ведемо логічні умови для керування переміщенням зерна між вузлами вимагають, щоб зерно транспортувалося лише за наявності наступних умов: вузол  $i$  готовий до відправки (контроль стану  $X_1$  і  $X_2$ ); напрямок руху зерна заданий правильно ( $X_3$ ); швидкість переміщення задовільна ( $X_4$ ); відсутнє перевантаження ( $X_5$ ); вузол  $j$  готовий прийняти зерно ( $X_6$ ); та система має активне живлення ( $X_7$ ).

В результаті логічне рівняння для переміщення зерна між вузлами  $i$  та  $j$  має вид:

$$x_{ij} = X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge \neg X_5 \wedge X_6 \wedge X_7, \quad (17)$$

Відповідно до зазначеного логічного рівняння визначаємо обмеження: кожен вузол може відправляти та отримувати зерно лише один раз

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} \leq 1 \quad \forall i, \quad \sum_{i=1, i \neq j}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j, \quad (18)$$

якщо на якомусь етапі система перевантажена, рух зерна припиняється:

$$X_5 = 0 \Rightarrow x_{ij} = 0 \quad \forall i, j, \quad (19)$$

в результаті отримаємо рівняння мінімізації енергоспоживання:

$$P_{e.d.min} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} P_{ij} \cdot (X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge \neg X_5 \wedge X_6 \wedge X_7), \quad (20)$$

Враховуючи вищезазначене, система логічних рівнянь (17-20) включає: цільову функцію для мінімізації енергоспоживання, обмеження на вхід і вихід для кожного вузла, а також обмеження на перевантаження. Вона мінімізує сумарне енергоспоживання, враховуючи витрати енергії для кожного можливого шляху між вузлами. Логічні рівняння забезпечують переміщення зерна тільки за виконання всіх критеріїв, таких як стан вузлів, напрямок, швидкість і відсут-

ність перевантаження. А обмеження заданої системи гарантують, що кожен вузол використовується лише один раз для відправки та прийому зерна, а також запобігають перевантаженню системи.

Ця система рівнянь може слугувати основою для розробки оптимальних алгоритмів побудови маршрутів транспортування в елеваторному комплексі, спрямованих на зниження енергоспоживання та підвищення ефективності транспортування зерна.

## V. ВИСНОВОК

Впровадження критерію мінімізації витрат електроенергії у програмно-логічний контролер автоматизованої системи транспортування зерна дозволяє обрати оптимальний маршрут з мінімальними енерговитратами. Завдяки алгоритму оптимізації система формує або вибирає найекономніший маршрут з урахуванням потужності приводів та вимог щодо технічного стану обладнання. Це значно підвищує енергоефективність процесу, знижуючи загальне споживання електроенергії для транспортування.

Оптимізація енергоспоживання реалізується шляхом обчислення сумарної потужності всіх задіяних приводів і вибору маршруту з найменшими енергетичними витратами. Для цього використовуються логічні умови й алгоритми, зокрема алгоритм комбіо-жера, який мінімізує витрати енергії, враховуючи всі вузли маршруту і забезпечуючи проходження через кожен із них один раз.

Розроблена математична модель алгоритму враховує обмеження на використання механізмів і виключає підцикли, що сприяє формуванню єдиного оптимального шляху. Система логічних рівнянь, побудована на основі цього алгоритму, задає умови мінімізації енерговитрат, керуючи рухом зерна тільки за умови готовності вузлів до прийому, правильного напрямку, належної швидкості та відсутності перевантаження. Цей підхід запобігає перевантаженню системи та забезпечує економне використання енергії при дотриманні всіх вимог безпеки та функціональності.

Таким чином, інтеграція зазначеного критерію оптимізації забезпечує ефективне і безперервне транспортування зерна з мінімальними енерговитратами, підвищуючи загальну енергоефективність елеваторного комплексу та дозволяючи уникнути непродуктивних витрат.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Мардзявко, В. (2020). Аналіз організації керування обладнанням для забезпечення транспортування зернової продукції на елеваторах. *Інженерія природокористування*, 18(4), 35–41. DOI:10.37700/enm.2020.4(18).35-41
- [2] Мардзявко В. А., Тимчук С. О., Сиротенко М. О. (2021). Підвищення ефективності технологічного

- процесу елеваторного комплексу за рахунок оптимальної маршрутизації. Інженерія природокористування. 22(4), 82–88. DOI: 10.5281/zenodo.6964706
- [3] Мардзявко, В. А., & Тимчук, С. О. (2021). Аналіз методу маршрутизації транспортно-технологічних ліній переміщення зерна на елеваторах. *У Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі* (с. 233–234).
- [4] Тимчук, С. О., Кунденко, П. М., & Вахоніна, Л. В. (2021). Аналіз транспортування зернової продукції на елеваторах. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 4(112), 96–106. DOI: 10.31521/2313-092X/2021-4(112)-10
- [5] Просяник О. В., Просяник М. О., Ткаченко С. М. (2012). Перспективні напрямки розвитку автоматизованих систем на підприємствах зберігання та переробки зерна. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 39, 128–136.
- [6] Мардзявко, В. (2022). Критерій оптимальності елеваторного комплексу для підвищення енергоефективності. *Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions* (с. 571–575).
- [7] Просяник О. В. (2010). Застосування SCADA – системи для керування технологічними маршрутами транспортування зерна, *Зберігання та переробка зерна*. 4, 51–55.
- [8] Dyck, G. (2023). Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling. *Smart Agricultural Technology*, (3), 2772–3755. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100079
- [9] Білюк, І. (2023). Система стеження за мікроманіпулятором на основі п'єзоелектричного двигуна. *У 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System* (с. 1–6). DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402375
- [10] Кунденко, М.П., Мардзявко, В.А., Руденко, А.Ю. (2024). Використання критеріїв оптимізації процесу маршрутизації елеваторного комплексу. *Електротехніка та енергетика*. 4, 44–50. DOI:10.15588/1607-6761-2023-4-5
- [11] Соснин, К. В., Ткаченко, С. Н., & Просяник, А. В. (2016). Автоматизація переміщення зерна – осередок інтегрованої АСУ. *Зберігання та переробка зерна*, 80(2), 32–40.
- [12] Просяник, А. В., & Ткаченко, С. М. (2012). Актуальні задачі автоматизації підприємств зберігання і переробки зерна. *Зберігання та переробка зерна*, 8(158).
- [13] Сиротенко, М., Мкртумян, С., & Тимчук, С. (2019). *Спосіб підвищення енергоефективності роботи зернопереробних і зернозберігаючих комплексів* (Патент України № 130996).
- [14] Сиротенко, М., Мкртумян, С., & Тимчук, С. (2019). *Спосіб підвищення якості транспортування зерна у зернопереробних і зернозберігаючих комплексах* (Патент України № 148511).
- [15] Бишевец Н. Г., Бишевец Н. М., Бойков А. И. (2024). Задача комівояжера як універсальний інструмент для оптимізації маршрутів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського*. 35(1), 97-102. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.1/15
- [16] Біла Г.Д., Корчинський О.О., Стецюк П.І. (2022). Використання NEOS-сервера для розв'язання двох класів оптимізаційних задач. *Cybernetics and Computer Technologies*. 4, 56–81. DOI: 10.34229/2707-451X.22.4.5

Стаття надійшла до редакції 21.10.2024

## OPTIMIZATION OF ENERGY USE DURING GRAIN TRANSPORTATION ROUTING AT THE ELEVATOR

MARDZIAVKO V.A. assistant, Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: vitalijmardzavko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7327-9215;

RUDENKO A.Y. assistant, Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: andrey0911r@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5103-6412;

**The purpose of the work.** The purpose of this work is to create a mathematical model and justify the algorithm for minimizing energy consumption during grain transportation in the elevator complex by optimizing the transportation route.

**Research methods.** An analytical research method was applied to study existing approaches to route optimization and energy minimization algorithms. A mathematical method is applied to formalize the problem of minimizing energy consumption in the elevator complex. An algorithmic method was used to develop and adapt algorithms, such as the salesman's problem, to the specifics of grain transportation.

**Obtained results.** The obtained results showed that the implementation of the algorithm for optimizing the grain transportation route based on the criterion of minimizing energy consumption can significantly reduce the total energy consumption of the elevator complex. The developed mathematical model and algorithm based on the Salesman's problem allows to describe and explain the provision of efficient route selection that passes through all necessary nodes only once, with minimal energy costs. A system of logical equations that takes into account the state of nodes, overload, speed and direction of movement will ensure its effectiveness in reducing energy consumption.

**Scientific news.** The scientific novelty of the work consists in the development of an algorithm for choosing the optimal grain transportation route based on the minimization of energy consumption, which integrates the mathematical model of the co-traveler problem with Miller-Tucker-Zemlin conditions for the exclusion of subcycles. For the first time, a system of logic equations was proposed, which takes into account the condition of the nodes, the direction of movement, the speed and the absence of overloading. The algorithm also optimizes transportation time, which ensures increased energy efficiency and productivity of automated elevator systems.

**Practical value.** The practical value of the research lies in the possibility of introducing the developed algorithm into the automated control systems of elevator complexes to increase energy efficiency and optimize work. The proposed methodology facilitates the automated selection of routes with minimal energy consumption, whilst accounting for the technical characteristics of the equipment and the prevailing operating conditions. This contributes to the reduction of the total cost of electricity, increasing the productivity and reliability of the system, ensuring economic benefit and stable operation of the transport infrastructure.

**Key words:** optimization of energy consumption, routing algorithm, elevator complex, software-logic controller, traveling salesman problem, mathematical model, automation, energy efficiency, logic equations, transport system.

## REFERENCES

- [1] Mardziavko, V. (2020). Analysis of the organization of equipment management for ensuring the transportation of grain products at elevators. *Environmental Engineering*, 18(4), 35–41. DOI: 10.37700/enm.2020.4(18).35-41
- [2] Mardziavko V. A., Tymchuk S. O., Syrotenko M. O. (2021). Increasing the efficiency of the technological process of the elevator complex through optimal routing. *Environmental Engineering*. 22(4), 82–88. DOI: 10.5281/zenodo.6964706
- [3] Mardziavko V. A., & Tymchuk, S. O. (2021). Analysis of the routing method of transport and technological lines for moving grain at elevators. In *Youth and Agricultural Technology in the 21st Century* (pp. 233–234).
- [4] Tymchuk, S. O., Kundenko, P. M., & Vakhonina, L. V. (2021). Analysis of grain transportation on elevators. *Bulletin of Agricultural Science of the Black Sea Region*, 4(112), 96–106. DOI:10.31521/2313-092X/2021-4(112)-10
- [5] Prosiyanik O. V., Prosiyanik M. O., Tkachenko S. M. (2012). Promising directions for the development of automated systems at grain storage and processing enterprises. *Collection of scientific papers of the National Mining University*. 39, 128–136.
- [6] Mardziavko, V. (2022). Optimality criterion of the elevator complex for increasing energy efficiency. *Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions* (pp. 571–575).
- [7] Prosiyanik O. V. (2010). Application of SCADA - systems for controlling technological routes of grain transportation, *Grain storage and processing*. 4, 51–55.
- [8] Dyck, G. (2023). Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling. *Smart Agricultural Technology*, (3), 2772–3755. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100079
- [9] Biliuk, I. (2023). Micromanipulator tracking system based on a piezoelectric engine. In *5th International Conference on Modern Electrical and Energy System* (pp. 1–6). DOI:10.1109/MEES61502.2023.10402375
- [10] Kundenko, M.P., Mardziavko, V.A., Rudenko, A.Iu. (2024). Using criteria for optimizing the routing process of the elevator complex. *Electrical Engineering and Energy*. 4, 44–50. DOI: 10.15588/1607-6761-2023-4-5
- [11] Sosnyn, K. V., Tkachenko, S. N., & Prosiyanik, A. V. (2016). Automation of grain movement - the core of an integrated ACS. *Grain Storage and Processing*, 80(2), 32–40.
- [12] Prosiyanik, A. V., & Tkachenko, S. M. (2012). Current tasks of automation of grain storage and processing enterprises. *Grain storage and processing*, 8(158).
- [13] Syrotenko, M., Mkrtumian, S., & Tymchuk, S. (2019). *Method of increasing the energy efficiency of grain processing and grain storage complexes* (Patent of Ukraine No. 130996).
- [14] Syrotenko, M., Mkrtumian, S., & Tymchuk, S. (2019). *Method of improving the quality of grain transportation in grain processing and grain storage complexes* (Patent of Ukraine No. 148511).
- [15] Byshevets N. H., Byshovets N. M., Boikov A. I. (2024). The problem of a traveling salesman as a universal tool for route optimization. *Scientific notes of V. I. Vernadsky TNU*. 35(1), 97-102. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.1/15
- [16] Bila H.D., Korchytskyi O.O., Stetsiuk P.I. (2022). Using the NEOS server to solve two classes of optimization problems. *Cybernetics and Computer Technologies*. 4, 56–81. DOI: 10.34229/2707-451X.22.4.5

## ПІДХОДИ У МОДЕЛЮВАННІ СИСТЕМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ГІБРИДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

ВАСИЛЕНКО О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційної безпеки та наноелектроніки Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: drvasylenkoolga@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6535-3462;

СНІЖНОЙ Г.В. д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційної безпеки та наноелектроніки Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: snow@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1452-0544;

**Мета роботи.** Вибір адекватного програмного забезпечення та розробка методики моделювання для економічного мультидоменного моделювання системи розподілу та перетворення електроенергії з урахуванням системи керування для сучасних транспортних засобів, зокрема, для гібридного електромобіля із паливним елементом (HEV).

**Методи дослідження.** Основним методом дослідження є математичне моделювання; для структурного синтезу моделі системи перетворення електроенергії та порівняльного аналізу програм використано евристичні методи прийняття рішень на базі порівняння метрик варіантів.

**Отримані результати.** Запропоновано спосіб декомпозиції HEV з точки зору сфери застосування існуючих програм для моделювання його підсистем. Підсистеми з блоків такої структурної схеми придатні для досліджень засобами однодоменних програм моделювання. Показані перспективи програм класу автоматизованого проєктування в електроніці (ECAD) для мультидоменного моделювання HEV, оскільки центральним і основним блоком перетворення є електронний домен. На базі обраних метрик програмного забезпечення обґрунтовано вибір програм для моделювання системи перетворення електроенергії, з можливістю організації модельних інтерфейсів для забезпечення мультидоменного моделювання та забезпеченням коректного експорту-імпорту моделей при переходах між рівнями абстракції. Запропоноване послідовне використання обраних програм автоматизованого інжинірингу (CAE) та ECAD, із переносом інформації про модель та результати симуляції, що здатне забезпечити як оптимальний синтез системи автоматичного керування на базі критерію запасу по фазі із дослідженням зони стійкості по мапі реалізацій, так і глибокий аналіз енергетичних показників силової частини перетворювачів. Для апробації методики обрано паралельну топологію енергетичної системи із блоком суперконденсаторів, перетворювачем підвищувального типу в режимі керування напруги та перспективним чотирьохклучовим двонаправленим перетворювачем Buck-Boost в режимі керування струмом. Для підвищення стійкості системи, запропоновано використовувати контролер Туре3, який поєднує можливість компенсатора та модулятора.

**Наукова новизна.** Запропоновано новий підхід до моделювання енергетичної підсистеми HEV, який враховує мультидоменність системи та вимагає її розгляду, по-перше, як системи автоматичного керування на макрорівні у CAE-програмі SmartCtrl, із попереднім розширенням її бібліотеки шляхом синтезу передаточних функцій в ECAD-програмі PSIM, та подальшим поверненням на мікрорівень для аналізу енергетичних характеристик і пара-метричної оптимізації перетворювачів разом із системами керування на рівні електричних схем в PSIM. На основі аналізу можливостей програм моделювання компонентів агрегативної системи HEV запропонований варіант структурної схеми моделі енергетичної підсистеми з урахуванням можливостей адекватного застосування «однодоменних» програм та показані перспективи їхнього використання для мультидоменного моделювання HEV. Визначено специфічний набір метрик програм для обґрунтованого вибору програмного забезпечення при дослідженні подібних систем.

**Практична цінність.** Представлена методика послідовного моделювання енергетичної системи в комплексі програм автоматизованого інжинірингу та автоматизованого проєктування SmartCtrl+PSIM фірми Altair із взаємним обміном даних, забезпечує комплексний аналіз та оптимізацію характеристик цієї підсистеми сучасних транспортних засобів.

**Ключові слова:** гібридний автомобіль; система перетворення енергії; мультидоменні системи; програми CAE та ECAD; метрики програм; методика моделювання; мапа реалізації.

### I. ВСТУП

Сучасні транспортні засоби поєднують базові елементи та нові системи, які безперервно змінюють-

ся та вдосконалюються. До систем, які значно поширюють функціональні можливості автомобіля, відносяться водневі паливні елементи та суперконденсатори. Паливний елемент виробляє електроенергію, ви-

користуючи хімічну енергію, що утворюється під час взаємодії між воднем і окисною речовиною, зазвичай киснем [1]. До переваг цієї технології слід віднести високу надійність та відсутність шкоди навколишньому середовищу, а завдяки своїй масштабованості, паливні елементи можуть використовуватися не тільки для автомобілів, але й для інших транспортних засобів. Гібридні електромобілі (Hybrid Electric Vehicle – HEV) із паливним елементом в якості первинного джерела енергії, є високоперспективними системами, тому виробникикладають значні кошти в їх дослідження. Наприклад, японська компанія Toyota та німецька BMW вбачають у них найбільш екологічні моделі транспортних засобів наступного покоління і підвищують рівень співпраці в дослідженнях і виробництві.

Однак паливні елементи мають повільну динаміку, що є перешкодою їхнього використання для транспорту. Крім того, їхня низька вихідна напруга та нездатність до рекуперації вимагає використання додаткових пристроїв та систем вторинних джерел енергії на транспорті. Такими додатковими пристроями в системі генерації є акумуляторна батарея, або суперконденсатор. Їх додають для прискорення реакції енергетичної системи (наприклад, при прискоренні автомобіля, треба різко підвищити струм якоря двигуна за короткий проміжок часу) та для забезпечення рекуперації енергії під час гальмування.

Система розподілу та утилізації електроенергії має величезний вплив на такі показники якості (метрики) транспортних засобів, як ефективність, вартість, надійність, розмір, запас ходу тощо. В собівартості сучасного автомобіля доля електронних пристроїв доходить до 50%. З появою нових джерел живлення та різних типів накопичувачів, варіації напруг живлення, підвищення рівня вимог та жорстких стандартів виробництва, оптимальний синтез структури та аналіз параметрів системи розподілу енергії є надзвичайно важливими. Саме тому, задача її моделювання є гостро актуальною. Критично важливим є дослідження характеристик енергетичної системи в динаміці (із врахування обраного профілю споживання енергії) разом із системою керування, отже, таке моделювання має здійснюватися на різних рівнях абстракції.

На перший погляд здається, що задача структурного і параметричного синтезу електронної підсистеми автомобіля є окремою і цілком лежить в межах електронного домену, однак насправді її неможливо розв'язати без інтеграції моделі системи розподілу електроенергії із моделями інших підсистем HEV. Сучасний автомобіль є агрегативною системою, яка поєднує підсистеми різної фізичної природи, що значно ускладнює вибір програмного забезпечення, оскільки більшість програм автоматизованого проектування орієнтовані на дослідження процесів в певному домені (є однодоменними). Таким чином актуалізується задача пошуку програмного забезпечення для всебічного дослідження енергетичної підсистеми із

врахуванням мультидоменності HEV та характеристик системи автоматичного керування.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

З точки зору мехатроніки, модель сучасних транспортних засобів утворюється синергетичним поєднанням моделей з трьох доменів: механіки, електроніки та інформаційних технологій [2]. Для визначення можливих шляхів реалізації комплексного моделювання, розглянемо різні способи декомпозиції сучасних транспортних засобів. З огляду на потоки енергії та блоки перетворення, взаємодію підсистем схематично можна представити рисунком 1.

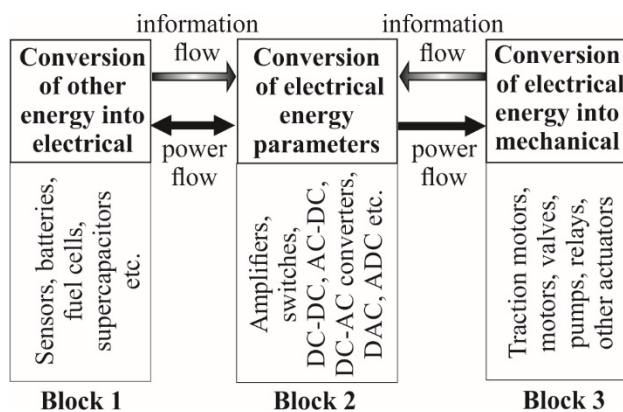


Рисунок 1. Варіант декомпозиції сучасних транспортних засобів

Розбиття на блоки тут виконано за типом перетворення енергії: до першого блоку віднесені сенсори та джерела живлення, які є перетворювачами іншої (хімічної, теплової, механічної тощо) енергії на електричну. До пристроїв та підсистем перетворення параметрів електроенергії (Блок 2) ми віднесли не тільки перетворювачі (такі, як трансформатори, випрямлячі, інвертори та імпульсні регулятори DC-DC), але й системи цифрової електроніки (підсистеми регуляції, контролю, обробки інформації) та аналогової електроніки (підсилювачі, драйвери тощо). Цифроаналогові та аналогово-цифрові перетворювачі також віднесені до центрального блоку. Апаратне забезпечення інформаційних технологій також представлено даним блоком. Таким чином, силова та інформаційна електроніка тут розглядається з огляду на її можливість змінювати параметри електромагнітної енергії.

З «точок зору» програм моделювання електронних пристроїв, перший блок рис. 1 (паливний елемент, суперконденсатор, акумулятор тощо) є генератором електричного сигналу. Сигнал може поступати на вхід другого блоку у вигляді потоку (струму), або потенціалу (напруги). Перетворювачі енергії (другий блок рис. 1) узгоджують параметри і характеристики електромагнітної енергії для навантаження. Навантаженням для системи (блок 3) є актуатори – всі пристрої та підсистеми HEV, які виконують переміщення в просторі і описуються (навіть частково) рівняннями

з механічного домену. В режимі рекуперативного гальмування блок 3 стає генератором енергії, потік якої потребує трансформації параметрів в блоці 2 перед зберіганням/рекуперації енергії в блоці 1.

Інформаційні потоки від блоків 1 та 3 – це дані від сенсорів, але в більш широкому розумінні, це може бути інформація від моделей систем Машинного бачення (якщо автомобіль в режимі автопілота), результати моделювання в Digital Twin автомобіля, потоки даних від Smart sensors та аналітика, отримана з Хмарних сервісів.

#### Аналіз підходів до моделювання HEV

Вибір оптимальної програми для моделювання як підсистем гібридних автомобілів, так і системи в цілому є вкрай важливим. Як при будь-якому виборі, критеріями оптимальності виступають ціна і функціонал (можливості програмного забезпечення). Ціною може бути як грошове представлення, так і час, витрачений на дослідження, зокрема, на узгодження моделей при переході на інший рівень абстракції, або до іншого домену. Для передпроектних досліджень та для задач постановки віртуальних лабораторних робіт у пов'язаних з даним питанням освітніх компонентах, критерій економічності виходить на перше місце.

Програми моделювання поділяються за призначенням і, як слідство, відрізняються апаратом симуляції (солверами). Нижче використані аббревіатури для таких основних математичних процесорів: Автоматизоване проектування в електроніці (Electronics Computer-aided design, ECAD), автоматизований інжиніринг (Computer-aided Engineering, CAE), САПР машинобудування (Mechanical Engineering CAD, MCAD), також відоме як автоматизація механічного проектування (MDA). Системи комп'ютерної алгебри (Computer Algebra System, CAS), це фактично універсальні математичні процесори, які мають бібліотеки як моделей підсистем та елементів різної фізичної природи для їхнього моделінгу (етапу побудови моделі), так і відповідні бібліотеки солверів для їхньої симуляції (етапу розв'язання рівнянь).

Підхід до симуляції може бути каузальним, або акаузальним [3]. Каузальний підхід властивий більшості CAE (оскільки вони призначені для дослідження систем автоматичного керування на високому рівні абстракції), акаузальний – системам CAD, де симуляція здійснюється шляхом розв'язання систем алгебродиференціальних рівнянь, що описують фізичні явища в межах одного домену на низькому рівні абстракції. CAS може поєднувати обидва підходи, оскільки забезпечує симуляцію на різних рівнях абстракції, в тому числі для інформаційних систем, а отже, забезпечує мультидоменне моделювання.

Гарним прикладом програм для мультидоменного моделювання є такі, що дозволяють створити цифрового двійника (Digital Twin) транспортного засобу, наприклад Simulink® [4]. При цьому модель може адресуватися до підсистем, які є реальними пристро-

ями, підключеними до портів комп'ютера. За допомогою інтерфейсів і протоколів зв'язку створюється відповідно середовище моделювання. Такій підхід дозволяє розробити високоточні моделі електродвигунів, паливних елементів, багатокорпусних підвісок або систем охолодження за допомогою Simscape® [5]. HEV в Simscape® моделюється як агрегативна мультидоменна система із підключенням реальних пристроїв за технологію HiL [6]. Однак, це висуває жорсткі вимоги до розподілення обчислень та обсягів пам'яті для зберігання результатів симуляції, вимагає використання Хмарних технологій. Вартість таких програм вимірюється десятками тисяч доларів.

Але існують і економічні (в плані вартості програм і часу, витраченого на моделінг) «однодомні» програми, які можуть бути придатними для моделювання системи розподілу електроенергії HEV, що, однак, потребує розробки відповідного методичного і математичного забезпечення. З огляду на призначення та можливості (математичний апарат) таких програм моделювання, систему HEV варто розбити на такі структурні блоки (рис. 2).

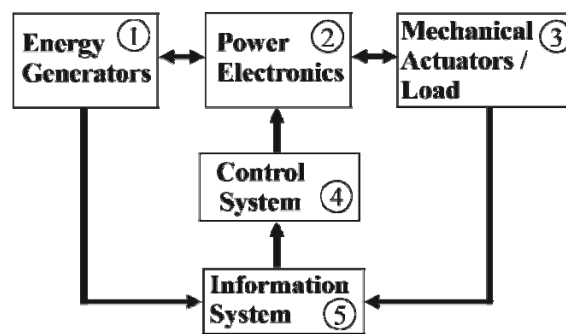


Рисунок 2. Структурні блоки HEV з огляду на специфіку програм моделювання

Розглянемо задачі та програми моделювання для цих блоків для формування критеріїв їхньої придатності у розв'язанні поставлених задач комплексного моделювання системи розподілу енергії в транспортних засобах.

1. Підсистема генераторів електроенергії, моделюються в CAS, або у відповідних однодомних CAD. Задача дослідження – оптимізація внутрішніх та зовнішніх метрик паливних елементів, акумуляторів та суперконденсаторів.

Моделювання генераторів електроенергії може мати на меті оптимізацію внутрішніх параметрів, наприклад при дослідженні характеру і ефективності хімічних реакцій при зміні умов процесу, або оптимізацію зовнішніх параметрів (струм, опір), що вимагає мультидоменного моделювання (наприклад, в структурах генератор енергії + система заряду-розряду). Відповідно, відрізняються і засоби моделювання.

Наприклад, програма SimScale, як платформа розробки програмного забезпечення для хмарного

моделювання, використовується для гідродинамічного моделювання (Computational Fluid Dynamics, CFD) і термічного аналізу (Thermal Analysis) елементів генераторів електроенергії. Наприклад, для оптимізації структур паливних елементів програма SimScale використовує аналіз на базі кінцевих елементів (Finite Element Analysis, FEA). Це дозволяє симулювати та оптимізувати конструкції водневих паливних елементів, мінімізуючи потребу у дорогих фізичних прототипах та отримати уявлення про конструкцію та роботу паливних елементів, у тому числі про те, як різні робочі та екологічні параметри впливають на продуктивність [7]. В [8] показані результати дослідження термодинаміки паливного елемента, зокрема, потоку теплової енергії із цілком покращення температурного менеджменту системи генерації. У [9] наведено модель суперконденсатора та показані результати симуляції під час його заряду та розряду. Модельний експеримент був відтворений в середовищі програми LabVIEW 2016. Симуляція в [8, 9] здійснювалася на платформі MATLAB, який можна віднести до класу CAS, висока функціональність та універсальність яких поєднуються із високою вартістю.

Ansys Motor-CAD [10] це спеціалізована програма для проектування та моделювання систем генерації електроенергії, зокрема, для електродвигунів, для тривимірного моделювання акумуляторних батарей, що надає можливість вдосконалювати конструкції, збалансовуючи безпеку, продуктивність, розмір, вартість і надійність. Висока вартість Ansys пояснюється тим, що система поєднує в собі програми класу CAE та CAD, із можливістю передачі інформації у власну систему CAM (Computer-aided manufacturing), використовує як мультидоменний підхід, так безбар'єрний транзит даних між програмами інжинірингу та проектування, тобто між моделями макрорівня та мікрорівня (реалізовано мультирівневість).

2. Підсистема силової електроніки (блок 2 на рис. 2), моделюється в на мікрорівні в ECAD. Задача моделювання – дослідження фазових змінних для оптимізації параметрів пристроїв силової електроніки.

Перетворювачі, підсилювачі, драйвери та електропривод моделюються в ECAD на рівні електричних схем, елементами на етапі збирання моделі в редакторі схем (моделінг) є зосереджені елементи (резистори, транзистори, реактивні елементи тощо), а математичною базою для етапу симуляції є методи розв'язання нелінійних неоднорідних алгебраїчно-диференціальних рівнянь [12]. Елементи системи генерації (блок 1 рис. 2) емуляються зосередженими моделями (джерелами електричного сигналу), при цьому симулятор програми електронного домену оперує тільки такими їхніми «зовнішніми» функціями та параметрами, як фазові змінні (напруга, струм, потужність) і вимагає попереднього визначення модельних інтерфейсів (активних і реактивних вхідних та вихідних опорів).

Моделі основних перетворювачів електроенергії є в ECAD програмах, зокрема в PSIM [12]. Моделі

інших перетворювачів можна побудувати на базі моделей елементів силової електроніки з їх бібліотек. Деякі економічні ECAD програми (наприклад, Micro Cap12) дозволяють створювати нові моделі і дають можливість оцінювати потужність, температурні залежності, вартість і навіть розмір елемента. Якщо ECAD є складовою CADAM (computer-augmented design and manufacturing), ці дані передаються для розводки друкованих плат, на верстати, та в цифрові платформи, наприклад ERP (Enterprise resource planning) цифрового виробництва [13].

Енергетична система автомобіля працює в режимі постійних перехідних процесів. Широкі можливості для дослідження і оптимізації підсистем HEV відкриваються, коли враховується зміна споживаної потужності відповідно до обраного циклу руху [14, 15]. Наприклад, в міському циклі профіль витрат енергії змінюється дуже швидко, тому моделювати її без контролюючої системи та із статичним навантаженням немає сенсу. Під час моделювання в ECAD такий підхід можна реалізувати через варіюваний за заданим законом поведінковий елемент (наприклад нелінійний програмований резистор), що є предметом наших подальших досліджень. В замському циклі, коли машина рухається довго із постійною швидкістю, це можна умовно прийняти за стаціонарний режим роботи системи автоматичного керування перетворювачем (CAK).

3. Механічна частина (Блок 3 на рис. 2), моделюється в MCAD та в CAS. Для аналізу характеристик транспортних засобів, до цього домену варто включити всі об'єкти, які здійснюють будь-яке переміщення в просторі і потребують керування, яке для мехатронних систем є інтелектуальним. Структура електроприводу залежить від обраного типу тягового двигуна і впливає на вибір топології систем перетворення енергії. Ця підсистема також є мультидоменною, оскільки має узгоджувати механічні характеристики двигуна із електричними характеристиками пристроїв електронного домену і навпаки.

Існують програми, спеціально орієнтовані для моделювання, імітації, візуалізації та тестування механічних підсистем автомобіля та автомобіля в цілому. Деякі з них дозволяють дослідити поведінку автомобіля в динаміці в різних умовах (Engineering, Driving Simulators & Game Development); або для моделювання роботи окремих компонентів транспортного засобу, наприклад систем допомоги водієві (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) або функцій автономного водіння.

Механічні підсистеми транспортних засобів традиційно моделюються в MCAD, де можуть використовуватися як моделі із розподіленими параметрами, що потребує розв'язання системи рівнянь із приватними похідними на етапі симуляції, так і моделі із зосередженими параметрами; і тоді використовується математичний апарат, схожий із таким в ECAD. Це відкриває можливості спільного моделювання меха-

нічного та електронного домену в ECAD на базі розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь в повних похідних [16].

4. Control system (Блок 4 рис. 2), моделюється на макрорівні в CAE та в CAS. Задача дослідження – оптимізація структури та параметрів контролюючих систем із ціллю підвищення стійкості всієї системи.

Багаторівневі адаптивні системи автоматичного керування з кількома зворотними зв'язками пронизують і охоплюють всю систему сучасного автомобіля і мають настільки високий рівень складності та мультизадачності, що потребують багато процесорного керування та регуляторів з домену цифрової електроніки. Ми пропонуємо досліджувати HEV на верхньому рівні абстракції як багатоконтурну САК і моделювати її в CAE за допомогою блок-схем, використовуючи каузальний підхід [17], при цьому необхідно забезпечити безбар'єрну передачу даних від CAE до ECAD для динамічного моделювання силової ступені системи розподілу енергії.

CAE мають бібліотеки стандартних блоків систем автоматичного керування (інтегратори, суматори, блоки затримки тощо) та підсистеми для автоматичного синтезу модуляторів, компенсаторів і фільтрів. Таким чином, CAE мають значні переваги для комплексного моделювання HEV як автоматизованої системи. Деякі контури систем керування можуть бути спроектовані на базі аналогової мікроелектроніки, зокрема для перетворювачів і складатися з ШІМ-контролерів, компенсаторів тощо і потребувати додаткового моделювання на мікрорівні, що вимагає розробки механізму імпорту-експорту моделей для переходу між CAE та CAD.

5. Системи інформаційної електроніки (блок 5 на рис.2) моделюються в CAS та CAE на верхніх рівнях абстракції, де елементами для моделінгу виступають блок-схеми, нейронні мережі, ланцюги Петрі, графи тощо. Засоби та методи для симуляції (етапу розв'язання задачі) також специфічні, наприклад, оптимізація матриці ваг нейронних мереж, дискретна математика. До цього блоку входять також інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) покоління 4.0 (на базі розумних сенсорів) та підсистеми інтелектуальної системи керування. ІВС має в якості входів датчики (струму, напруги, тиску, температури тощо) та входить в склад САК та кібер-фізичних систем Індустрії 4.0, наприклад із розгортанням моделей Машинного навчання для керування. В останньому випадку, задачами ІВС 4.0 є не тільки вимірювання та перетворення даних на інформацію, підготовка для передачі в контролюючу підсистему [18], але й розв'язання суто «інтелектуальних» задач, наприклад, підтримки людино-машинного інтерфейсу, прийняття рішень, прогнозного обслуговування тощо.

### III. МЕТА РОБОТИ

Проектування оптимальної системи розподілу

електроенергії в HEV є ітераційним процесом, який передбачає аналіз і оцінку таких критеріїв якості системи як: ефективність, надійність, складність тощо. Важливо оцінити потужність силової ступені перетворювачів та керованість і стійкість системи в цілому. Як це впливає з вищенаведеного аналізу, існуючі підходи та доступні за ціною програми не дають можливості оцінити всі метрики одразу (фазові змінні, стійкість, термічні характеристики тощо). Програми, які надають такі можливості, або надто дорогі для більшості вчених з академічної спільноти України, або слугують тільки для внутрішніх потреб певних виробників і є об'єктами промислової таємниці.

В той же час, передпроектні наукові дослідження в галузі структурного та параметричного синтезу енергетичної підсистеми HEV, зокрема заради впровадження результатів досліджень у навчальний процес, потребують простих і доступних, але при цьому універсальних інструментів моделювання. Тому, задача вибору доступного програмного забезпечення для комплексного дослідження систем перетворення енергії в мультидоменній системі сучасних транспортних засобів є актуальною задачею. Метою даної роботи є визначення такого програмного забезпечення та розробка методики розробки моделей (моделінгу) для досліджень системи розподілу електроенергії як систем автоматичного керування (на макрорівні), так для аналізу енергетичних характеристик електричних схем силової частини цієї підсистеми на мікрорівні.

### IV. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРОГРАМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СУЧАСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

Оскільки при комплексному моделюванні системи перетворення електроенергії необхідно враховувати мультидоменність HEV, найбільш очевидним вибором для дослідження системних метрик буде CAE. Однак, більшість задач дослідження енергетичних характеристик мехатронної системи зручно виконувати в ECAD, оскільки електрична енергія є проміжною формою в обміні енергією між доменами (рис. 1). Це вимагає побудови таких моделей підсистем з першого та третього блоків рис. 1, які мають інтерфейси із параметрів з електронного домену, тобто можуть взаємодіяти із електронним доменом через струми та напруги. Сучасні ECAD придатні також і до мультидоменного моделювання, якщо закласти в модель формули з потрібних доменів і перевизначити імена на «електричні» (струми, напруги і так далі). Математична база в сучасних ECAD розширена можливостями програмування і самостійного визначення нових функцій, що дає широкі можливості для розробки емпіричних моделей для будь-якого домену.

3 точки зору математичного процесора ECAD, актуатори є навантаженням: пасивним, яке моделюється RLC-компонентами, або активним. Для моде-



лювання рекуперативних процесів додаються керувані джерела струму. Крутний момент, швидкість, частота обертів та інші «неелектричні» функції та параметри в таких моделях емулюються через струми та напруги, оскільки це є специфіка даного типу програмного забезпечення. Наприклад, в Micro-Cap 12 наведені моделі двигунів змінного, постійного струму та крокового мотора, які побудовані повністю із використанням бібліотеки електронного домену. Це дозволяє досліджувати навантажений електропривод і оптимізувати його параметри. Мультидоменний підхід використаний також в ECAD програмі HEV Design Suite від PSIM, що дозволяє досліджувати системи трансмісії разом із синтезом систем керування.

Отже, спільне моделювання всіх трьох блоків рис. 1 можливе в ECAD, якщо розроблені моделі всіх блоків мають «електричний» набір параметрів, або в програмах CAE, якщо поставлена задача дослідження HEV як автоматизованої системи і визначені передаточні функції (наприклад, з використанням перетворення Лапласа) блоків, що складають САК. Можливе також спільне використання програм обох класів, якщо необхідно дослідити енергетичні характеристики з урахуванням контролюючої системи. Саме такий підхід запропонований авторами, для застосування якого розроблена відповідна методика.

Авторами були проведені експерименти з моделювання підсистем HEV в різних програмах CAE та ECAD. Серед розмаїття ECAD програм були обрані MicroCap 12 та PSIM, оскільки їхні бібліотеки моделей містять готові блоки для формування моделей перетворювачів, а їхні солвери орієнтовані на специфіку моделей пристроїв силової електроніки (жорсткі,

погано обумовлені не-однорідні нелінійні диференціальні рівняння).

Для дослідження енергетичної системи як автоматизованої системи, були обрані програми 20-sim та SmartCtrl, як такі, які демонструють абсолютно різний підхід до моделювання. Наприклад, модель в 20-sim може включати блоки, отримані з бібліотек Bond-графів, нейронних мереж, схем заміщення пристроїв з різних доменів і блок-схем із передаточними функціями по Лапласу. Область застосування – моделювання мультидоменних систем на високому рівні абстракції. Є спеціальні інструменти по синтезу PID контролерів. Натомість, SmartCtrl це фактично спеціалізована програма по оптимальному синтезу систем керування перетворювачами електроенергії.

Огляд, представлений в першому розділі даної публікації, дозволив сформувати набір параметрів, які можна назвати специфічними метриками програм, які визначають ступінь їхньої придатності для поставлених задач комплексного мультидоменного моделювання силової ступені та системи керування в системі розподілення енергії в сучасних транспортних засобах. Аналіз метрик дозволяє прийняти оптимальні рішення щодо вибору програмного забезпечення.

Визначені метрики обраних програм наведені в Табл. 1. Для оцінки якості був використаний бінарний підхід. Мінус тут означає слабкість, або відсутність, символ +/- означає, що для реалізації цієї функції треба докласти певних зусиль, три плюса означає надзвичайно високий рівень показника.

**Таблиця 1.** Метрики якості програм для моделювання HEV

Метрики якості	ECAD		CAE	
	MicroCap 12	PSIM	SmartCtrl	20-sim
<b>Метрики економічності та функціональності</b>				
Наявність безкоштовної версії	+	+	+/-	+/-
Відсутність алгоритмічних збоїв	-	+	+	+
Підтримка мультидоменності	+	-	+	+++
Програмування нових функцій	+++	+	-	+
Підхід в симуляції	каузальний	каузальний	акаузальний	акаузальний
<b>Якість симуляції</b>				
Швидкість симуляції	-	+++	+	+/-
Точність симуляції	+++	+/-	+	+
Кількість доступних солверів	3	1	2	10
Кількість методів оптимізації	2	0	1	0
<b>Принцип побудови моделей</b>				
Метод блок схем (Block Diagram)	+	+	+	+
Графи зв'язку (BondGraph)	-	-	-	+

Схеми заміщення (Iconic Diagrams)	+	+	-	+
Рівняння	+	+/-	-	+
Спеціалізовані інструменти для дослідження систем автоматизації				
Аналіз стійкості	+	-	+	+/-
Карта нулів і полюсів	+	-	+	-
Годограф Найквіста	+	-	+	-
Мапа діапазону стійкості	-	-	+	-
Синтез регуляторів і фільтрів	+/-	-	+	+
Можливість безбар'єрного трансферу даних між рівнями абстракції та програмами				
Зв'язок із іншими програмами	Spice	SmartCtrl, MATLAB	PSIM, MATLAB	MATLAB
Мультирівневість	+	-	-	+++

В поставлених задачах дослідження, MicroCap продемонстрував проблеми із швидкістю симуляції, але має і переваги, оскільки володіє широкими можливостями як для дослідження силової ступені, так і для аналізу стійкості системи, допускаючи формування моделі із підсистемами різного рівня абстракції (мультирівневість), із можливістю синтезу нових функцій, як в домені часу, так і в домені комплексної частоти. Однак, при зростанні розмірності моделі, виникають алгоритмічні збої, які повністю нівелюють її переваги для комплексного моделювання складних систем.

20-sim є просунутою програмою інжинірингу та дизайну із бібліотеками моделей з електричного, механічного, гідравлічного доменів і домену термодинаміки. Для поставлених задач вона демонструє свої найліпші якості в галузі автоматичного синтезу регуляторів та лінійних систем. Однак, безкоштовна версія програми не дозволяє зберігати проект, що тим не менш, не робить її непридатною для використання в учбовому процесі для дослідження сучасних транспортних засобів, робототехнічних та мехатронних комплексів.

З першого погляду здається, що PSIM має занадто багато мінусів, але головна перевага цієї ECAD – це надзвичайна висока швидкість симуляції та можливість інтеграції із CAE-програмою SmartCtrl, якщо необхідно дослідити енергетичні характеристики з урахуванням контролюючої системи. Обидві програми входять до Altair Group і дозволяють імпортувати/експортувати результати симуляції та інформацію про модель одна до іншої. В досить простій програмі SmartCtrl [19] можна налаштувати вимоги до керування з точки зору стабільності та запасу стійкості системи (моделювання на високому рівні абстракції) та передати інформацію для спільного моделювання в PSIM на рівні схем. SmartCtrl не є універсальною програмою інжинірингу, її специфіка – це системи керування перетворювачами, але ця програма має унікальні інструменти для дослідження зони стійкості та надає детальну інформацію про розроблені компоненти в трактах керування конвертерами.

### Методика моделювання енергетичних систем HEV в програмах CAE+ECAD групи Altair

Розглянемо етапи моделювання (тобто розробки моделі) енергетичної системи HEV. Моделювання має кілька стадій: структурний синтез та параметричний синтез моделі, адаптація моделі для обраного програмного забезпечення та імплементація (розгортання) моделі (підготовка до симуляції).

**1. Структурний синтез моделі.** Якість HEV значною мірою визначається топологією та параметрами компонентів енергетичної системи. Оскільки паралельна топологія є компромісною з огляду складності та ефективності, для розробки методики моделювання ми для досліджень використали варіант паралельної топології HEV із сетом суперконденсаторів та паливного елемента, наведений на рис. 3, провівши структурний синтез, виходячи з критеріїв оптимальності енергоспоживання системи [20].

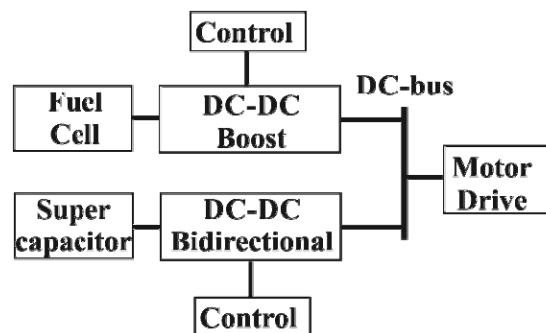


Рисунок 3. Варіант паралельної топології HEV

**2. Параметричний синтез моделі.** На цьому етапі для блоків обраної топології обираються відповідні пристрої. Для керування паливним елементом обрано підвищувальний перетворювач (Boost converter) з регулюванням напруги, який з'єднує блок паливних елементів (Блок Fuel Cell) з ланкою постійного струму (DC-bus).

Сет суперконденсаторів забезпечує покращення динаміки споживаної потужності та забезпечує рекуперацію. Для керування потоком енергії від суперко-

нденсаторів пропонуємо використовувати перспективний двонаправлений DC-DC перетворювач з чотирма електронними ключами (Four-switch Buck-Boost converter, FSBB), який працює в режимі контролю струму (Current Mode), що у порівнянні з традиційним керуванням напругою, забезпечує менші коливання вихідної напруги та більш високу надійність завдяки швидкому вимірюванню струму для захисту від короткого замикання та перевантаження на виході. Перетворювач FSBB має тільки один дросель (що мінімізує його розміри та вартість) та може працювати в трьох режимах роботи (Buck, Boost, Buck-Boost), що є пріоритетом при його виборі, в зв'язку з широким діапазоном зміни вхідної напруги [21].

**3. Адаптація моделі.** Як було зазначено вище, ми пропонуємо на верхньому рівні абстракції представляти систему перетворення електроенергії як САК, що в свою чергу вимагає використання програм САЕ. Наш вибір – програма SmartCtrl [19], яка дозволяє проєктувати систему керування незалежно від фізики її підсистем.

Енергетична система HEV в стандартних термінах Теорії автоматичного керування має вигляд, наведений на рис. 4. Щоб спроектувати систему керування в SmartCtrl, необхідно визначити передавальні функції (по Лапласу) всіх блоків цієї структурної моделі: перетворювача/Plant  $G_{VD}(s)$ , датчика/Sensor  $H(s)$ , компенсатора/Compensator  $R(s)$  та модулятора/Modulator  $M(s)$ . Якщо вони відсутні в бібліотеці SmartCtrl, їх можна або імпортувати з PSIM, або ввести «вручну».

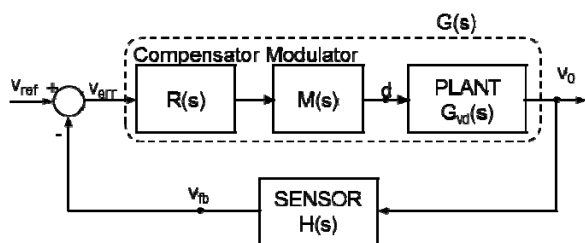


Рисунок 4. Енергетична система як система автоматичного керування в SmartCtrl

**4. Імплементація моделі.** Бібліотека SmartCtrl містить топології основних типів конвертерів, зокрема Boost, однак передавальну функцію  $G_{VD}(S)$  для FSBB конвертера необхідно попередньо отримати в ECAD програмі PSIM [12]. Отримана передавальна функція далі експортується в SmartCtrl (для блоку Plant на рис. 4) і далі послідовно в спеціальних вікнах програми обираються сенсор, компенсатор та модулятор, а їхні передавальні функції автоматично підключаються до спільної системи рівнянь моделі для подальшого розв'язання в домені комплексної частоти. Ми обрали дільник напруги в якості сенсора та повністю аналоговий контролер Туре3, який поєднує в собі модулятор (PWM) та компенсатор, що найкращим чином забезпечує підвищення стійкості САК.

Під час синтезу компенсатора для FSBB була створена «Мапа рішення» (Solution Map), що є унікальною особливістю SmartCtrl, яка дозволяє дослідити зону стабільності і відповідно до її параметрів синтезувати оптимальний регулятор. Верхня межа білої зони на рис. 5 визначаються максимальним запасом фази (Phase Margin, phase boost) [22], якого можна досягти за допомогою вибраного компенсатора на частоті, де Амплітудно-частотна характеристика (Bode Graph) падає до 0дБ (Crossover frequency). Нижня частина дійсної області відповідає інтегратору, який просто додає  $90^0$  до фази передаточної функції системи без регулятора. Для обраної схеми дослідження запас по фазі на частоті Crossover в 7кГц є  $45^0$ , тому система є стійкою.

Результатом параметричного синтезу в САЕ є їхні оптимальні та стійкі системи керування. Потім результати (синтезовані системи керування) експортуються до PSIM, де виконується спільна симуляція всієї системи, при чому елементи системи генерації емулюються через джерела постійного струму.

Симуляція в програмі PSIM в тисячі разів швидше, ніж в більшості ECAD, що було для нас вагомим чинником при її виборі, оскільки повна модель системи досить жорстка (маю суттєву різницю між постійними часу підсистем  $\tau$ ) і має велику розмірність (багато елементів = багато рівнянь). PSIM дозволяє дослідити не тільки дисипативні властивості системи, але й температурні режими елементів з електронного домену. Опосередковано можна оптимізувати і параметри системи генерації енергії, визначити розмір основного джерела живлення (паливного елемента) і допоміжних джерел живлення.

## V. ВИСНОВКИ

Аналіз підходів і засобів моделювання сучасних транспортних засобів, зокрема HEV, як агрегативних систем, дозволив сформулювати критерії (набір специфічних метрик) для вибору адекватного програмного забезпечення та для прийняття оптимальних рішень на етапі формування математичного забезпечення проєктування, зокрема для задач передпроектних досліджень та в навчальному процесі.

Для економічного дослідження енергетичної системи сучасних транспортних засобів, пропонується розглядати пристрій гібридного автомобіля як комплекс систем автоматичного керування із центральною роллю електронних перетворювачів, що визначило принцип його декомпозиції та вибір відповідних програм класу САЕ та ECAD для моделювання. Сформована методика для дослідження енергетичної системи HEV в комплексі ECAD програми PSIM та САЕ програми SmartCtrl дозволяє поєднати можливості синтезу оптимальної системи контролю із аналізом силової ступені перетворювачів. Головними критеріями для вибору програми SmartCtrl були безбар'єрний трансфер даних між нею та PSIM та її надзвичайно широкі можливості дослідження зони стійкості

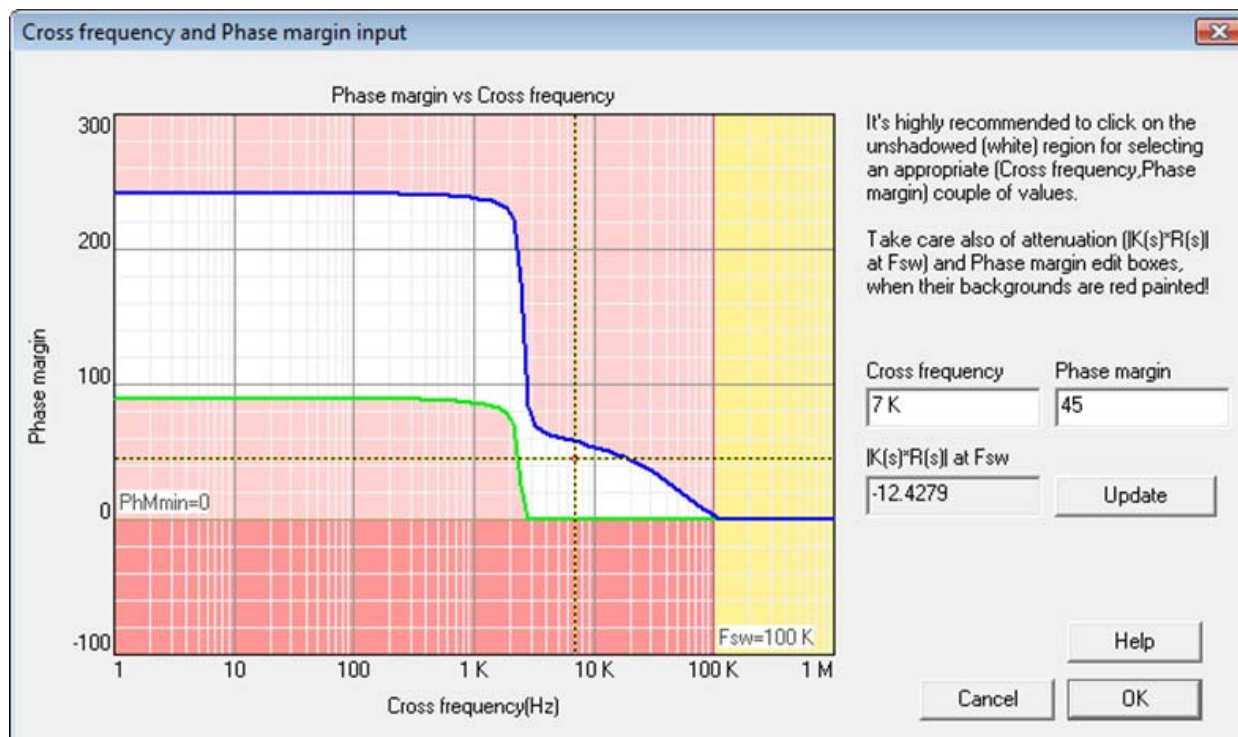


Рисунок 5. Карта рішення для дослідження зони стійкості FSBB в SmartCtrl

систем керування перетворювачами.

Під час апробації розробленої методики моделінгу з'ясувалося, що при комплексному дослідженні моделі енергетичної системи із системою керування, SPICE-сумісні ECAD програми демонструють погану збіжність та інші алгоритмічні збої, що можна усунути зменшенням кроку інтегрування і зменшенням жорсткості моделі, але це або катастрофічно збільшує час симуляції, або призводить до втрати адекватності. Натомість, програма PSIM, використовуючи максимально можливу лінеаризацію вихідної моделі, демонструє в подібних задачах надзвичайно високу швидкість симуляції. І хоча PSIM не володіє мульти-доменністю бібліотек, як MicroCap12, або 20-sim, вона здатна генерувати та експортувати передаточні функції перетворювачів, придатні для розширення бібліотеки SmartCtrl та імплементувати синтезовані в SmartCtrl оптимальні системи керування.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Felseghi R.A. Hydrogen fuel technology for the sustainable future of stationary applications / R.A. Felseghi, E. Carcadea, M.S. Raboaca // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, no. 3:4593. doi: 10.3390/en12234593.
- [2] Kuru K. Transformation to advanced mechatronics systems within new industrial revolution: a novel framework in automation of everything (AoE) / K. Kuru, H. Yetgin // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 41395–41415. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2907809.
- [3] Василенко О.В. Аналіз програм моделювання мехатронних систем / О.В. Василенко // *Радиоелектроніка, інформатика, управління*. – 2015. – № 3. – С. 80–87. doi: 10.15588/1607-3274-2015-3-10.
- [4] Minh V.T. Optimal fuel consumption modelling, simulation, and analysis for hybrid electric vehicles / V.T. Minh, R. Moezzi, J. Cyrus, J. Hlava // *Appl. Syst. Innov.* – 2022. – Vol. 5, no. 2:36. doi: 10.3390/asi5020036.
- [5] Tudoroiu R.E. SOC estimation of a rechargeable lithium battery used in fuel-cell hybrid electric vehicles-comparative study of accuracy and robustness performance based on statistical criteria. Part I: Equivalent models / R.E. Tudoroiu, M. Zaheeruddin, N. Tudoroiu, S. Radu // *Batteries*. – 2020. – Vol. 6, no. 3:42. doi: 10.3390/batteries6030042.
- [6] Amal S. HiL simulation and controller prototyping of EV/HEV systems using multi-core xEV Real time simulator / S. Amal, V. Vishnu, R.V. Chacko, S. Ghugal, P. Mengaji, U. Karle // *IEEE Transportation Electrification Conference, [Pune], 12 Jan. 2017. / ITEC-India*. – Pune, 2019. – P. 1–5. doi: 10.1109/ITEC-India.2017.8333892.
- [7] Felseghi R.A. Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications / R.A. Felseghi, E. Carcadea, M. Raboaca, C. Trufin, C. Filote // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, no. 23:4593. doi: 10.3390/en12234593.

- [8] Afshari E. Computational analysis of heat transfer in a PEM fuel cell with metal foam as a flow field / E. Afshari // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. – Vol. 139, no. 4. – P. 2423–2434. doi: 10.1007/s10973-019-08354-x.
- [9] Castiglia V. Modelling, simulation and characterization of a supercapacitor / V. Castiglia, N. Campagna, C. Spataro, C. Nevoloso, F. Viola, R. Miceli // 2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference, [Palermo], 15 jul. 2020. / MELECON. – Palermo, 2020. – P. 46–51. doi: 10.1109/MELECON48756.2020.9140474.
- [10] Majeed A. Ansys software for mechanical engineering / A. Majeed // *Manav Rachna International University*. 2022. doi: 10.13140/RG.2.2.18076.97927.
- [11] Василенко О.В. Підвищення якості моделювання динамічних систем вибором оптимальних алгоритмів симуляції / О. В. Василенко, Я.І. Петренко // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2016. – № 4. – С. 11–18.
- [12] Alonso A. A guideline for employing PSIM on power converter applications: Prototyping and educational tool / A. Alonso, F. Marafao, D. Brandao, E. Tedeschi, J. Guerreiro // *Conference: Brazilian Power Electronics Conference*, 19–22 nov. 2017. / COBER. – 2017. – P. 1–6. doi: 10.1109/COBER.2017.8257284.
- [13] Василенко О.В. Менеджмент цифрового виробництва : монографія / О.В. Василенко, Г.В. Сніжної, Ю.С. Ямненко ; Нац. ун-т «Запорізька політехніка». – Запоріжжя : НУЗП, 2022. – 120 с.
- [14] Gaoua Y. Hybrid systems energy management using optimization method based on dynamic sources models / Y. Gaoua, S. Caux, P. Lopez, C. Raga, A. Barrado, A. Lazaro // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, [Coimbra], 27–30 oct. 2014. / VPPC. – Coimbra, Portugal, 2014. – P. 1–10. doi: 10.1109/VPPC.2014.7007079.
- [15] Василенко О.В. Концепція моделювання електромобілів для оптимізації запасу ходу в різних патернах руху / О.В. Василенко, Г.В. Сніжної, С.А. Івченко // *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем : матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. конф., [Дніпро], 1–3 лист. 2023 р. / УДХТУ*. – Дніпро, 2023. – С. 155–156.
- [16] Stjepandic J. Standardized approach to ECAD/MCAD collaboration / J. Stjepandic, C. Emmer, A. Fröhlich, V. Jäkel // *Journal of Aerospace Operations*. – 2014. – Vol. 3, no.3, 4. – P. 587–596. doi: 10.3233/978-1-61499-440-4-587.
- [17] Василенко О.В. Вибір методу оптимізації систем автоматичного керування в системах автоматизованого інжинірингу / О.В. Василенко, Я.І. Петренко // *Енергетика і автоматика*. – 2017. – № 1. – С. 75–89.
- [18] Vasylenko O. Design of information and measurement systems within the Industry 4.0 paradigm / O. Vasylenko, S. Ivchenko, H. Snizhnoi // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2023. – no. 1. – P. 45–54. doi: 10.32620/reks.2023.1.04.
- [19] Fernández H. Aplicando el smart controller del PSIM / H. Fernández // *Commodities*. – 2015. – P. 1–12. doi: 10.13140/RG.2.1.3452.8087
- [20] Raga A. Anocibar, José F. Sierra Analysis and Comparison of Four Regenerative Power Distribution Architectures Based on Fuel Cell / A. Raga, I. Barrado, A. Quesada, C. Lázaro // *Supercapacitors and Batteries 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, [Orlando], 10–13 nov. 2008. / IECON. – Orlando (USA), 2008. – P. 545–550. doi: 10.1109/IECON.2008.4758012.
- [21] Ravi D. Bidirectional DC to DC converters: An overview of various topologies, switching schemes and control techniques / D. Ravi, M. Reddy, S. Letha, P. Samuel // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 7. – P. 360–365. doi: 10.14419/ijet.v7i4.5.20107.
- [22] Quenzer-Hohmuth S. Challenges and implementation aspects of switched-mode power supplies with digital control for automotive applications / S. Quenzer-Hohmuth, T. Rosahl, S. Ritzmann, B. Wicht // *Advances in Radio Science*. – 2016. – Vol. 14. – P. 85–90. doi: 10.5194/ars-14-85-2016.

*Стаття надійшла до редакції 11.10.2024*

## APPROACHES IN MODELING ELECTRICAL ENERGY CONVERSION SYSTEMS IN HYBRID VEHICLES

VASYLENKO O.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the department of information security and nanoelectronics of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: drvasylenkoolga@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6535-3462;

SNIZHNOI G.V. Sci.D, Professor, Professor of the department of information security and nanoelectronics of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: snow@zp.edu.ua. ORCID: 0000-0003-1452-0544;

**Purpose.** Selection of adequate software and development of a modeling methodology for economical multi-domain simulation of the power distribution and conversion system, taking into account the control system for modern vehicles, in particular, for a hybrid electric vehicle with a fuel cell (HEV).

**Methodology.** The main method of research is mathematical modeling; heuristic decision-making methods based on the comparison of option metrics are used for the structural synthesis of the model of the power conversion system and comparative analysis of programs.

**Findings.** A method of decomposition of HEV in terms of the scope of existing programs for modeling its subsystems is proposed. Subsystems made up of blocks of such a structural scheme are suitable for research using single-domain modeling programs. The prospects of electronics computer-aided design (ECAD) programs for multi-domain modeling of HEVs are shown, since the electronic domain is the central and main block of the transformation. On the basis of the selected software metrics, the choice of programs for modeling the power conversion system is substantiated, with the possibility of organizing model interfaces to ensure multi-domain modeling and ensuring correct export-import of models when moving between abstraction levels. The sequential use of selected computer-aided engineering (CAE) and ECAD programs is proposed, with the transfer of information about the model and simulation results. This is capable of providing both optimal synthesis of the Automatic Control System based on the Phase Margin criterion with the study of the stability zone according to the Solution map, and in-depth analysis of the energy performance of the power stage of the converters. To test the method, a parallel topology of the power system with a block of supercapacitors, a boost-type converter in voltage control mode and a promising Four-Switch Bidirectional Buck-Boost converter in current control mode were selected. To increase the stability of the system, it is proposed to use a Type3 controller, which combines the capabilities of a compensator and a modulator.

**Originality.** A new approach to modeling the HEV energy subsystem is proposed, which takes into account the multi-domain nature of the system and requires its consideration, first, as an Automatic Control System at the macro level in the CAE program SmartCtrl, with a preliminary expansion of its library by synthesizing Transfer Functions in the ECAD program PSIM, and a subsequent return to the micro level for analyzing energy characteristics and parametric optimization of converters together with control systems at the level of electrical circuits in PSIM. Based on the analysis of the capabilities of the programs for modeling the components of the HEV aggregate system, a variant of the structural diagram of the model of the energy subsystem is proposed, taking into account the possibilities of adequate application of "single-domain" programs and the prospects for their use for multi-domain modeling of HEV are shown. A specific set of program metrics is determined for a reasonable choice of software when studying such systems.

**Practical value.** The presented method of sequential modeling of the energy system in the complex of automated engineering and automated design programs SmartCtrl+PSIM from Altair Group with mutual data exchange provides a comprehensive analysis and optimization of the characteristics of this subsystem of modern vehicles.

**Keywords:** hybrid car; energy conversion system; multi-domain systems; CAE and ECAD programs; program metrics; modeling methodology; Solution Map.

## REFERENCES

- [1] Felseghi, R.A., Carcadea, E., Raboaca, M.S., (2019). Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications, *Energies*, 12(3):4593. doi:10.3390/en12234593.
- [2] Kuru, K., Yetgin, H., (2019). Transformation to advanced mechatronics systems within new industrial revolution: a novel framework in automation of everything (AoE), *IEEE Access*, 7. 41395–41415. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2907809.
- [3] Vasylenko, O., (2015). Analysis of programs for mechatronic systems modeling, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 3. 80–87. doi: 10.15588/1607-3274-2015-3-10.
- [4] Minh, V.T., Moezzi, R., Cyrus, J., Hlava, J., (2022). Optimal fuel consumption modelling, simulation, and analysis for hybrid electric vehicles, *Appl. Syst. Innov.* 5(2), 36. doi: 10.3390/asi5020036.
- [5] Tudoroiu, R.E., Zaheeruddin, M., Tudoroiu, N., Radu, S., (2020). SOC estimation of a rechargeable li-ion battery used in fuel-cell hybrid electric vehicles-comparative study of accuracy and robustness performance based on statistical criteria. Part I: Equivalent models, *Batteries*. 6(42). doi: 10.3390/batteries6030042/
- [6] Amal, S., Vishnu, V., Chacko, R. V., Ghugal, S., Mengaji, P., Karle, U., (2017). HiL simulation and controller prototyping of EV/HEV systems using multi-core xEV Real time simulator, *IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, Pune, India, 1–5, doi: 10.1109/ITEC-India.2017.8333892/
- [7] Felseghi, R.A., Carcadea, E., Raboaca, M., Trufin, C., Filote, C., (2019). Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications, *Energies*. 12(23):4593. doi: 10.3390/en12234593.
- [8] Afshari, E., (2020). Computational analysis of heat transfer in a PEM fuel cell with metal foam as a flow field, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 139(4). 2423–2434. doi: 10.1007/s10973-019-08354-x.

- [9] Castiglia, V., Campagna, N., Spataro, C., Nevoloso, C., Viola, F., Miceli, R., (2020). Modelling, simulation and characterization of a supercapacitor, Conference: IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). 46–51. doi: 10.1109/MELECON48756.2020.9140474.
- [10] Majeed, A., (2022). Ansys software for mechanical engineering, Manav Rachna International University. doi: 10.13140/RG.2.2.18076.97927.
- [11] [Vasylenko, O.V., Petrenko, Ya.I., (2016). Improving the quality of modeling dynamic systems by choosing optimal simulation algorithms, Radio Electronics, Computer Science, Control, 4. 11–18.
- [12] Alonso, A., Marafao, F., Brandao, D., Tedeschi, E., Guerreiro, J., (2017). A guideline for employing PSIM on power converter applications: Prototyping and educational tool, Conference: Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). 1–6. doi: 10.1109/COBEP.2017.8257284.
- [13] Vasylenko, O.V., Snizhnoi, G.V., Yamnenko, Y.S., (2022). Digital Production Management (monograph), Zaporizhzhia: National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 120 p.
- [14] Gaoua, Y., Caux, S., Lopez, P., Raga, C., Barrado, A., Lazaro, A., (2014). Hybrid systems energy management using optimization method based on dynamic sources models, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC. 1–10. doi: 10.1109/VPPC.2014.7007079.
- [15] Vasylenko, O.V., Snizhnoi, G.V., Ivchenko, S.A., (2023). Concept of modeling electric vehicles for optimizing range in different traffic patterns, Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference on Computer Modeling and Optimization of Complex Systems, Dnipro: UDCTU. 155–156.
- [16] Stjepandic, J., Emmer, C., Fröhlich, A., Jäkel, V., (2014). Standardized approach to ECAD/MCAD collaboration, Journal of Aerospace Operations. 3. 587–596. doi: 10.3233/978-1-61499-440-4-587.
- [17] Vasylenko, O.V., Petrenko, Ya.I., (2017). Choosing a method for optimizing automatic control systems in automated engineering systems, Power Engineering and Automation. 1. 75–89.
- [18] Vasylenko, O., Ivchenko, S., Snizhnoi, H., (2023). Design of information and measurement systems within the Industry 4.0 paradigm, Radioelectronic and Computer Systems. 1. 45–54. doi: 10.32620/reks.2023.1.04.
- [19] Fernández, H., (2015). Aplicando el smart controller del PSIM, Commodities. 1–12. doi: 10.13140/RG.2.1.3452.8087
- [20] Raga, A., Barrado, I., Quesada, A., Lázaro, C., (2008). Anocíbar, José F. Sierra Analysis and Comparison of Four Regenerative Power Distribution Architectures Based on Fuel Cell, Supercapacitors and Batteries 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics 10-13 November 2008 Orlando, FL, USA. 545–550. doi: 10.1109/IECON.2008.4758012.
- [21] Ravi, D., Reddy M, Letha S., Samuel, P., (2018). Bidirectional DC to DC converters: An overview of various topologies, switching schemes and control techniques. International Journal of Engineering & Technology, 7(4.5). 360-365. doi: 10.14419/ijet.v7i4.5.20107.
- [22] Quenzer-Hohmuth, S., Rosahl, T., Ritzmann, S., Wicht, B., (2016). Challenges and implementation aspects of switched-mode power supplies with digital control for automotive applications. Advances in Radio Science. 14. 85-90. doi:10.5194/ars-14-85-2016.

## РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА РОБОТОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ РУХУ В ПРОСТОРИ

- БІЛКА Д.О.** магістр кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: naulkx@gmail.com, ORCID: 0009-0007-9717-5171;
- ШАПТАЛА С.В.** аспірант, асистент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: stas.shaptala@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2617-5904;
- МИРОНОВА Н.О.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: natali.myronova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7484-559X;

**Мета роботи.** Розробка прототипу цифрового двійника робототехнічного пристрою, який дозволяє відтворювати рух об'єкта в реальному часі з високою точністю.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети було використано такі методи: інтеграція мікроконтролерів ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi з сенсором MPU6050, розробка прошивки на мові програмування C++ в середовищі Arduino IDE, створення серверного програмного забезпечення за допомогою PHP-скриптів та бази даних MySQL, а також розробка інтерактивної системи візуалізації даних у середовищі Unity. Також були застосовані методи фільтрації та калібрування даних для забезпечення їхньої точності.

**Отримані результати.** Було розроблено прототип цифрового двійника, який точно відтворює рухи фізичного об'єкта на основі даних з сенсорів MPU6050. Система забезпечує надійний збір та передачу даних з мікроконтролера на сервер без значних втрат або спотворень. Дані успішно зберігаються у базі даних MySQL та доступні для подальшого аналізу та візуалізації через інтерактивні 3D-моделі в Unity. Впроваджені механізми перевірки цілісності даних та стабільності з'єднання забезпечують високу надійність системи протягом тривалого часу.

**Наукова новизна.** Запропоновано підхід до розробки цифрового двійника, який об'єднує мікроконтролери ESP8266 та Arduino Uno R4 Wi-Fi з сенсором MPU6050 для збору та обробки даних з використанням алгоритмів фільтрації та калібрування даних для підвищення їхньої точності в режимі реального часу.

**Практична цінність.** Розроблений прототип цифрового двійника робототехнічного пристрою розширює можливості вивчення та дослідження технології цифрових двійників в робототехніці.

**Ключові слова:** цифровий двійник; робототехнічний пристрій; моніторинг даних у реальному часі; методи фільтрації та калібрування даних, візуалізація даних; інтернет речей.

### I. ВСТУП

Цифрові двійники стрімко перетворюються на незамінний інструмент у сучасних технологіях, забезпечуючи точне відтворення фізичних об'єктів у віртуальному просторі. Вони дозволяють здійснювати моніторинг, аналіз та оптимізацію об'єктів у реальному часі, що знаходить застосування у робототехніці, охороні здоров'я, промислових процесах та управлінні міською інфраструктурою.

Інтеграція цифрових двійників із технологіями Інтернету речей (IoT) сприяє розширенню їхніх можливостей через об'єднання даних із численних сенсорів для створення розподілених систем моніторингу та управління. Сенсори руху забезпечують високоточні вимірювання, що є критично важливими для реалізації реалістичних віртуальних моделей. З розвитком програмного забезпечення для обробки та візуалізації даних, цифрові двійники відкривають нові можливості для підвищення ефективності та надійності систем.

Попри це, існують значні виклики, пов'язані з вибором апаратних компонентів, обробкою даних у реальному часі та створенням цифрових моделей двійників. Зокрема, питання інтеграції мікроконтролерів ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi із сенсорами, такими як MPU6050, залишаються відкритими через їхню залежність від точності калібрування та стабільності передачі даних.

Дана стаття зосереджується на розробці прототипу цифрового двійника робототехнічного пристрою.



строю, що дозволяє точно відтворювати рух об'єкта у просторі в реальному часі. Основну увагу приділено інтеграції апаратних і програмних компонентів, розробці алгоритмів для обробки даних та візуалізації у 3D середовищі Unity.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасній науковій літературі концепція цифрових двійників активно розвивається, особливо в контексті IoT та автоматизації. Цифрові двійники використовуються для моделювання фізичних об'єктів, що дозволяє здійснювати їх моніторинг, аналіз та оптимізацію в реальному часі. Огляд останніх досліджень демонструє еволюцію цієї технології від простих моделей до комплексних інтегрованих систем, що включають різноманітні сенсори та програмні рішення.

Перші роботи в галузі цифрових двійників зосереджувалися на створенні віртуальних моделей промислових процесів для оптимізації виробництва. Наприклад, в дослідженні [1] запропоновано, що використання цифрових двійників у поєднанні з IoT, аналізом великих даних та динамічним керуванням кейсами дозволяє оптимізувати процеси обслуговування обладнання, зменшуючи витрати та підвищуючи ефективність через передбачувальну діагностику та проактивне управління. Ці ранні роботи заклали основу для подальшого розвитку цифрових двійників, підкреслюючи їхню важливість у підвищенні ефективності та надійності промислових систем.

З розвитком сенсорних технологій та збільшенням обсягів даних, зібраних з різних джерел, увага науковців переключилася на інтеграцію цих даних у єдину систему. Дослідження [2] розглядає методи об'єднання даних з різних сенсорів для створення більш точних та надійних цифрових двійників. Однією з ключових проблем, яка висвітлюється у цих роботах, є забезпечення точності та узгодженості даних, отриманих з різних джерел, що є критично важливим для коректного функціонування цифрового двійника.

Останні роки характеризуються значним прогресом у розробці алгоритмів для обробки та аналізу даних у реальному часі. Дослідження [3] демонструє використання машинного навчання для виявлення аномалій у даних, що збираються сенсорами. Це дозволяє створювати більш адаптивні та самонавчаючі цифрові двійники, які можуть автоматично реагувати на зміни умов експлуатації об'єкта. Подібні підходи сприяють підвищенню гнучкості та ефективності систем моніторингу.

Вибір архітектурних шаблонів також є важливим аспектом у розвитку цифрових двійників. У роботі [4] порівнюються різні архітектурні шаблони, використовувані для створення цифрових двійників, з акцентом на їхні функціональні характеристики та можливості інтеграції у різні системи. Наприклад, було проаналізовано шаблони Digital Monitor та Digital Control щодо їхньої здатності забезпечувати ефективний моніто-

ринг та управління фізичними об'єктами в реальному часі. Результати показали, що вибір відповідного шаблону дозволяє оптимізувати взаємодію між фізичними та цифровими компонентами системи, підвищуючи ефективність та надійність цифрового двійника. Це сприяє гнучкості та адаптивності системи до різних вимог та умов експлуатації, що особливо важливо при застосуванні цифрових двійників у різних галузях, таких як сільське господарство та харчова промисловість. Крім того, робота демонструє, як використання архітектурних шаблонів підтримує різні етапи життєвого циклу системи, забезпечуючи структуроване та масштабоване рішення для розробки цифрових двійників. Таким чином, системний підхід до вибору архітектурних шаблонів дозволяє створювати адаптивні цифрові двійники, що відповідають сучасним технологічним вимогам.

Вибір методів візуалізації також є важливим аспектом у розвитку цифрових двійників. У роботі [5] здійснено всебічний огляд існуючих підходів візуалізації, що застосовуються для цифрових двійників, з метою їх класифікації за типами даних, конкретними випадками використання, вимогами до інтерактивності та складності систем. Наприклад, дослідження виділяє різні підходи візуалізації, такі як графіки, діаграми та 3D-моделі, та розподіляє їх відповідно до специфічних потреб різних доменів застосування. Результати показали, що така класифікація дозволяє розробляти та впроваджувати інтерфейси візуалізації даних для цифрових двійників, забезпечуючи ефективний аналіз та прийняття рішень на основі інтегрованих даних.

В даному дослідженні існує потреба в розробці інтегрованих рішень, які не тільки забезпечують збір та обробку даних, але й їх подальшу візуалізацію у зручному для користувача форматі. Особливо актуальною є інтеграція сучасних технологій, таких як Unity, для створення інтерактивних 3D-візуалізацій, що дозволяють користувачам взаємодіяти з цифровими двійниками у реальному часі. Це сприяє підвищенню інтуїтивної зрозумілості системи та її практичній користності.

В [6] розглянуто можливості інтеграції цифрових двійників з платформами для візуалізації, спрямовані на покращення взаємодії між фізичними об'єктами та їхніми віртуальними моделями. Інтеграція включає створення інтуїтивних інтерфейсів для моніторингу та аналізу в реальному часі за допомогою віртуальної та доповненої реальності. Дослідження охоплює стандартизацію даних, забезпечення сумісності платформ та оптимізацію обробки великих обсягів інформації, приділяючи особливу увагу безпеці даних. Наведені приклади успішної інтеграції у виробництві, охороні здоров'я та міському управлінні демонструють ефективність візуалізаційних платформ у прийнятті рішень та оптимізації ресурсів. Висновки підкреслюють важливість міждисциплінарного підходу та співпраці між розробниками, інженерами та користувачами для

успішної реалізації інтеграції цифрових двійників з візуалізаційними системами.

Таким чином, аналіз останніх досліджень показує, що хоча значний прогрес був досягнутий у сфері цифрових двійників, існують ще багато напрямків для подальшого розвитку. Основні проблеми, що залишаються нерозв'язаними, стосуються інтеграції даних з різних сенсорів, оптимізації програмного забезпечення для реального часу та покращення методів візуалізації даних. Ці проблеми визначають напрямок подальших досліджень та розробок, спрямованих на створення більш ефективних та надійних цифрових двійників.

Тому актуальною є задача розробки прототипу цифрового двійника, який включає оптимальний вибір апаратних компонентів, розробку програмного забезпечення та інтеграцію сучасних методів обробки та візуалізації даних.

### III. ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ РОБОТИ

Метою даної роботи є розробка прототипу цифрового двійника робототехнічного пристрою, який дозволяє відтворювати рух об'єкта в реальному часі з високою точністю. Досягнення поставленої мети базується на інтеграції апаратних компонентів (мікроконтролери та сенсори) із програмним забезпеченням для збору, обробки та візуалізації даних.

Розроблений прототип повинен забезпечувати: точний збір параметрів руху, таких як лінійні прискорення та кутові швидкості; надійну передачу та збереження даних у базі даних; інтерактивну візуалізацію в 3D-середовищі для аналізу в реальному часі. Ця робота також спрямована на вирішення проблем масштабованості та стабільності цифрових двійників шляхом оптимізації програмного забезпечення та використання передових технологій візуалізації.

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

**Розробка апаратної частини.** Розробка апаратної частини прототипу цифрового двійника вимагає ретельного вибору та інтеграції апаратних компонентів для забезпечення точного збору, обробки та передачі даних. В даному дослідженні основну роль відіграють два типи мікроконтролерів – ESP8266 NodeMCU v3 [7] та Arduino Uno R4 Wi-Fi [8], а також сенсор руху MPU6050 [9]. Кожен з цих компонентів був обраний на основі своїх технічних характеристик, можливостей інтеграції та відповідності вимогам проекту.

Мікроконтролери ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi були вибрані як основні обчислювальні платформи для проекту з кількох причин. ESP8266 NodeMCU v3 відзначається високою продуктивністю та компактними розмірами, що робить його ідеальним для проектів, де важлива невелика вага та розміри пристрою. Цей мікроконтролер оснащений

32-бітним процесором Tensilica Xtensa LX106, який працює з частотою до 160 МГц, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для виконання складних алгоритмів обробки даних у реальному часі. Крім того, ESP8266 має 80 КБ SRAM та до 4 МБ флеш-пам'яті, що дозволяє зберігати великі обсяги інформації, необхідної для функціонування системи. Вбудований Wi-Fi модуль забезпечує безперебійну бездротову комунікацію з сервером, що є критично важливим для безперебійної передачі даних.



Рисунок 1. Плата мікроконтролеру Esp8266wifi

Arduino Uno R4 Wi-Fi, з іншого боку, пропонує більшу кількість аналогових входів, що є критично важливим для систем, що потребують підключення великої кількості сенсорів одночасно. Він оснащений мікроконтролером ATmega4809 з частотою 16 МГц, 6 КБ SRAM та 48 КБ флеш-пам'яті, що забезпечує стабільну роботу системи при обробці даних з численних джерел. Вбудований Wi-Fi модуль підтримує протоколи TCP/IP, UDP та HTTP, що дозволяє ефективно передавати дані на сервер без додаткових налаштувань. Крім того, Arduino Uno R4 Wi-Fi має 14 цифрових входів/виходів та 6 аналогових входів, що дозволяє підключити більше сенсорів, забезпечуючи гнучкість та масштабованість системи.

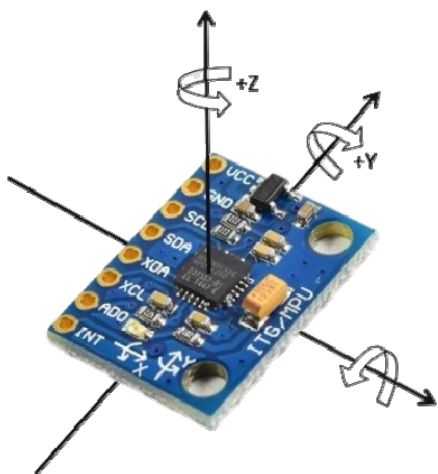


Рисунок 2. Плата Arduino uno R4 WIFI

Вибір ESP8266 та Arduino Uno R4 Wi-Fi обумовлений специфікою проекту. ESP8266 забезпечує висо-

ку швидкість обробки даних та більшу пам'ять флеш, що є перевагою для проектів, що вимагають великої кількості зберігання та обробки інформації. Arduino Uno R4 Wi-Fi, з іншого боку, пропонує більше аналогових входів, що робить його придатним для систем, де необхідно підключити велику кількість сенсорів. Це дозволяє створити гнучку та масштабовану систему, яка може адаптуватися до різних вимог проекту.

Основним сенсором, використаним у проекті, є MPU6050 – 6-осьовий датчик руху, що включає 3-осьовий акселерометр та 3-осьовий гіроскоп [9]. Цей сенсор забезпечує вимірювання лінійних прискорень та кутових швидкостей, що є критично важливими для створення точних цифрових двійників. MPU6050 має діапазон вимірювань акселерометра від  $\pm 2g$  до  $\pm 16g$  та гіроскопа від  $\pm 250$  до  $\pm 2000$  градусів за секунду. Вбудований 16-бітний АЦП забезпечує високу роздільну здатність вимірювань, а цифрове фільтрування допомагає зменшити шум та підвищити точність даних.



**Рисунок 3.** Модуль акселерометру та гіроскопу MPU6050

Інтеграція сенсора MPU6050 з мікроконтролерами ESP8266 та Arduino Uno R4 Wi-Fi здійснюється через інтерфейс I2C, що забезпечує стабільну та швидку комунікацію між пристроями. Це дозволяє збирати та передавати дані про рух об'єкта на сервер для подальшого аналізу та візуалізації. Крім того, для забезпечення стабільного живлення системи використовуються відповідні блоки живлення: 3.3V для ESP8266 та 5V для Arduino Uno R4 Wi-Fi. Це дозволяє уникнути перевантаження компонентів та забезпечити їхню надійну роботу протягом тривалого часу.

Підключення сенсора MPU6050 до мікроконтролера ESP8266 NodeMCU v3 здійснюється за допомогою наступних пінів: VCC до 3.3V, GND до GND, SDA до D2 та SCL до D1. Для Arduino Uno R4 Wi-Fi

підключення здійснюється наступним чином: VCC до 5V, GND до GND, SDA до A4 та SCL до A5. Це забезпечує надійне з'єднання між сенсором та мікроконтролером, що є критично важливим для точності та стабільності збору даних. Крім цього, було впроваджено додаткові заходи для захисту сенсора від перенапруги та електромагнітних завад, що може впливати на точність вимірювань.

Розміщення сенсора MPU6050 на платі мікроконтролера було проведено з урахуванням оптимального розташування для мінімізації впливу зовнішніх факторів, таких як вібрації та температурні зміни, на точність вимірювань. Важливою частиною інтеграції є забезпечення достатньої ізоляції сенсора від джерел електромагнітних завад, що можуть спричинити спотворення сигналів. Для цього використовувалися відповідні заземлення та фільтри, що дозволяють забезпечити стабільну роботу сенсора у різних умовах.

Одним із важливих аспектів апаратної частини є забезпечення достатньої кількості живлення для всіх компонентів системи. ESP8266 NodeMCU v3 потребує стабільного живлення 3.3V, тоді як Arduino Uno R4 Wi-Fi працює на 5V. Для цього використовувалися відповідні блоки живлення, що дозволяють забезпечити необхідні напруги та уникнути перевантаження компонентів. Крім того, було впроваджено систему моніторингу напруги, яка дозволяє виявляти будь-які збої у живленні та оперативно реагувати на них, забезпечуючи стабільну роботу системи.

Також для забезпечення захисту системи від потенційних електричних перешкод було впроваджено фільтри та стабілізатори напруги. Це допомагає зменшити вплив зовнішніх електромагнітних полів та забезпечити чистий сигнал для сенсора MPU6050, що покращує точність та надійність вимірювань. Використання додаткових конденсаторів та фільтрувальних елементів дозволяє мінімізувати шум та забезпечити стабільну роботу сенсора навіть у складних умовах експлуатації.

Інтеграція апаратних компонентів була проведена з урахуванням їхніх технічних характеристик та вимог до системи. Для ESP8266 NodeMCU v3 було створено компактну плату, на якій розміщені всі необхідні компоненти, включаючи сенсор MPU6050, забезпечуючи зручність монтажу та обслуговування системи. Arduino Uno R4 Wi-Fi було інтегровано з сенсором MPU6050 через відповідні з'єднувачі, що дозволяє легко підключати додаткові сенсори при необхідності розширення системи.

Під час тестування апаратної частини було проведено ряд експериментів для оцінки точності та стабільності вимірювань. Було встановлено, що сенсор MPU6050 забезпечує високу точність вимірювань, навіть при високих швидкостях руху. Однак, у випадках сильних вібрацій або змін температури, точність вимірювань може трохи знижуватися. Для покращення точності було впроваджено програмні фільтри, які

дозволяють усунути шум та аномалії в даних.

Крім того, було проведено тести на стабільність з'єднання між мікроконтролером та сервером. Під час тривалих експериментів виявлено, що система здатна підтримувати стабільне з'єднання без переривань, забезпечуючи безперебійну передачу даних. Це було досягнуто завдяки оптимізації тексту програми та використанню протоколів передачі даних.

Також було проаналізовано споживання енергії системою під час роботи. ESP8266 NodeMCU v3 показав низьке енергоспоживання в режимі очікування, що є перевагою для проєктів, де важлива автономність системи. Arduino Uno R4 Wi-Fi, хоча і має вищу споживчу потужність, все одно демонструє ефективність завдяки оптимізації тексту програми та використанню енергоефективних компонентів.

Була розроблена архітектура прототипу цифрового двійника, що відображає основні елементи системи, такі як сенсори MPU6050, мікроконтролери ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi, а також серверну інфраструктуру для збору та обробки даних. Графічне представлення дозволяє візуально уявити потік даних від сенсорів до мікроконтролерів, а далі до центрального сервера через бездротове з'єднання Wi-Fi. Також архітектура демонструє, як дані з сенсорів зберігаються у базі даних MySQL та доступні для подальшої візуалізації та аналізу через веб-інтерфейс або мобільний застосунок.

Архітектура прототипу цифрового двійника робототехнічного пристрою для відтворення руху у просторі наведена на рисунку 4.

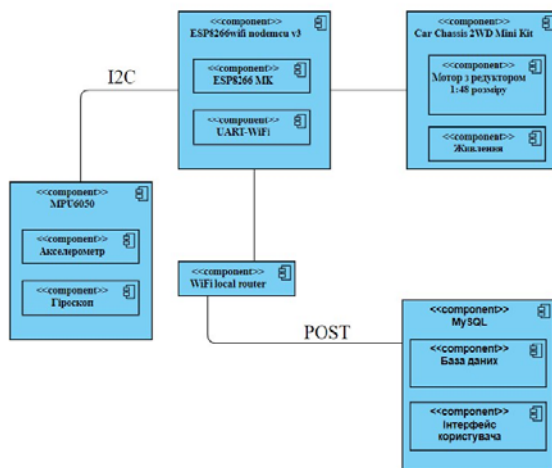


Рисунок 4. Архітектура прототипу цифрового двійника

Дана архітектура демонструє взаємодію між сенсорами, мікроконтролерами та сервером. Сенсори,

такі як MPU6050, підключаються до мікроконтролера через інтерфейси I2C або GPIO, після чого дані передаються на центральний сервер через Wi-Fi. На сервері дані обробляються, зберігаються у базі даних та доступні для візуалізації через веб-інтерфейс або мобільний застосунок. Архітектура забезпечує гнучкість та масштабованість системи, дозволяючи легко додавати нові сенсори або змінювати конфігурацію мікроконтролерів відповідно до вимог проєкту.

**Розробка програмної частини.** Реалізація програмної частини є невід'ємною складовою частиною розробки цифрового двійника, оскільки вона забезпечує функціональність системи, дозволяючи збирати, обробляти та передавати дані з сенсорів до серверу для подальшого аналізу та візуалізації. В даному дослідженні програмна частина охоплює розробку прошивки для мікроконтролерів ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi, а також створення серверного програмного забезпечення за допомогою PHP-скриптів та бази даних MySQL.

Прошивка для мікроконтролерів була розроблена з використанням середовища розробки Arduino IDE, яке є популярним інструментом серед розробників завдяки своїй простоті та широкій підтримці різних апаратних платформ. Основними бібліотеками, що використовувалися у проєкті, були Wire.h для роботи з інтерфейсом I2C [10], MPU6050.h для взаємодії з сенсором руху [11], ESP8266WiFi.h [12] для підключення до бездротових мереж та ESP8266HTTPClient.h [13] для здійснення HTTP-запитів. Використання цих бібліотек спрощує процес програмування, забезпечуючи необхідні функції для взаємодії з апаратними компонентами та мережевими протоколами.

Процес розробки прошивки починається з ініціалізації серійного зв'язку, що дозволяє відлагоджувати систему шляхом виведення інформації на серійний монітор. Це є важливим етапом для перевірки правильності роботи системи на ранніх стадіях розробки. Після ініціалізації серійного зв'язку відбувається ініціалізація інтерфейсу I2C, через який підключено сенсор MPU6050. Це дозволяє мікроконтролеру взаємодіяти з сенсором для зчитування даних про прискорення та кутові швидкості. Наступним етапом є підключення до Wi-Fi мережі за допомогою бібліотеки ESP8266WiFi.h. Цей процес включає в себе пошук доступних мереж, підключення до обраної мережі та перевірку статусу з'єднання, що гарантує стабільну передачу даних на сервер.

Після успішного підключення до мережі Wi-Fi, мікроконтролер ініціалізує сенсор MPU6050 та перевіряє його з'єднання за допомогою методу testConnection(). Якщо сенсор підключено успішно,

система переходить до циклу збирання та передачі даних. У циклі loop() мікроконтролер виконує зчитування даних з акселерометра та гіроскопа за допомогою методу getMotion6(), який повертає значення прискорень по осях x, y, z та кутових швидкостей по осях gx, gy, gz. Отримані дані використовуються для обчислення кутів нахилу roll та pitch за допомогою тригонометричних функцій atan2(). Обчислені кути виражаються в градусах, що дозволяє їх легко інтерпретувати та використовувати для візуалізації стану об'єкта.

Формули для обчислення кутів нахилу виглядають наступним чином:

$$roll = \text{atan2}(ay, az) \times \frac{180}{\pi}$$

$$pitch = \text{atan2}(-ax, \sqrt{ay^2 + az^2}) \times \frac{180}{\pi}$$

Ці кути є критично важливими для відображення орієнтації об'єкта у цифровому двійнику, оскільки вони визначають положення об'єкта у просторі. Тригонометричні функції дозволяють точно розрахувати кути нахилу на основі вимірних прискорень, що забезпечує високу точність та достовірність даних.

Після обчислення кутів, дані готуються до передачі на сервер через HTTP POST-запит. Для цього використовується бібліотека ESP8266HTTPClient.h, яка спрощує створення та відправку HTTP-запитів. Дані формуються у вигляді рядка з параметрами, що включають значення roll, pitch, ax, ay, az, gx, gy, gz. Цей рядок передається на сервер за допомогою методу http.POST(), який відправляє дані на вказаний URL PHP-скрипта. Код, що відповідає за передачу даних, виглядає наступним чином:

```
// Відправка даних на сервер
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    HTTPClient http;
    http.begin(client, serverName); // Використання нового API

    http.addHeader("Content-Type", "application/x-www-form-urlencoded");

    String httpRequestData = "roll=" + String(roll)
        + "&pitch=" + String(pitch)
        + "&ax=" + String(ax)
        + "&ay=" + String(ay)
        + "&az=" + String(az)
        + "&gx=" + String(gx)
```

```
        + "&gy=" + String(gy)
        + "&gz=" + String(gz);

    int httpStatusCode =
    http.POST(httpRequestData);

    if (httpStatusCode > 0) {
        String response = http.getString();
        Serial.println(httpStatusCode);
        Serial.println(response);
    } else {
        Serial.print("Error on sending POST: ");
        Serial.println(httpStatusCode);
    }

    http.end();
} else {
    Serial.println("WiFi Disconnected");
}
```

Наведений текст програми забезпечує повний цикл збору та передачі даних від сенсора до серверу. Мікроконтролер ESP8266 NodeMCU v3 зчитує дані з MPU6050, обчислює кути нахилу roll та pitch, а потім передає ці дані на сервер через HTTP POST-запит. PHP-скрипт на сервері приймає ці дані, перевіряє їхню повноту та вставляє у базу даних MySQL для подальшого аналізу та візуалізації.

Для забезпечення стабільності та надійності передачі даних було впроваджено механізм перевірки статусу з'єднання з Wi-Fi мережею перед здійсненням передачі даних. Якщо з'єднання встановлено успішно, дані відправляються на сервер. У випадку відсутності з'єднання система виводить повідомлення про роз'єднання, що дозволяє користувачу оперативно реагувати на проблему. Додатково було реалізовано механізм повторної передачі даних у випадку помилки під час відправки. Якщо HTTP POST-запит не вдалося виконати успішно, система повторює спробу відправки після певної затримки, що мінімізує втрати даних через тимчасові проблеми з мережею або сервером.

Важливою частиною програмного забезпечення є налаштування затримки між відправками даних. У даному проєкті затримка встановлена на 5 секунд, що дозволяє забезпечити баланс між частотою збору даних та навантаженням на сервер. Це також дозволяє зменшити споживання енергії, що є важливим аспектом для систем, що працюють на батареях або інших обмежених джерелах живлення. Затримка реалізована

за допомогою функції `delay(5000)`, яка затримує виконання циклу на 5000 мілісекунд.

Даний підхід дозволяє системі працювати у реальному часі, забезпечуючи актуальність отриманих даних для подальшого аналізу та візуалізації, не перевантажуючи при цьому сервер великою кількістю запитів.

**Розробка серверного програмного забезпечення.** На серверній стороні було розроблено PHP-скрипт, який відповідає за прийом даних через HTTP [14] POST-запити та їх збереження у базі даних MySQL. Цей скрипт забезпечує зберігання великих обсягів даних та їхній подальший аналіз. Скрипт починається з встановлення з'єднання з базою даних за допомогою параметрів сервера, користувача, пароля та назви бази даних. Використання об'єктно-орієнтованого підходу з класом `mysqli` дозволяє забезпечити безпечне з'єднання з базою даних [15].

```
<?php
$servername = "localhost";
$username = "root";
$password = "";
$dbname = "sensor_data";

// Створення з'єднання
$conn = new mysqli($servername, $username,
$password, $dbname);

// Перевірка з'єднання
if ($conn->connect_error) {
    die("Connection failed: " . $conn->connect_error);
}
?>
```

Після встановлення з'єднання скрипт отримує дані з HTTP POST-запиту за допомогою суперглобального масиву `$_POST`. Кожен параметр (`roll`, `pitch`, `ax`, `ay`, `az`, `gx`, `gy`, `gz`) перевіряється на наявність та коректність перед вставкою у базу даних. Це дозволяє уникнути вставки неповних або некоректних даних, що може негативно вплинути на якість аналізу та візуалізації.

```
// Отримання даних з HTTP-запиту
$roll = $_POST['roll'] ?? null;
$pitch = $_POST['pitch'] ?? null;
$ax = $_POST['ax'] ?? null;
$ay = $_POST['ay'] ?? null;
$az = $_POST['az'] ?? null;
```

```
$gx = $_POST['gx'] ?? null;
$gy = $_POST['gy'] ?? null;
$gz = $_POST['gz'] ?? null;

// Перевірка наявності всіх необхідних параметрів
if ($roll !== null && $pitch !== null && $ax !== null && $ay !== null && $az !== null && $gx !== null && $gy !== null && $gz !== null) {
    // Підготовка SQL-запиту з використанням підготовлених виразів
    $stmt = $conn->prepare("INSERT INTO mpu6050_data (roll, pitch, ax, ay, az, gx, gy, gz) VALUES (?, ?, ?, ?, ?, ?, ?, ?)");
    $stmt->bind_param("ddddddd", $roll, $pitch, $ax, $ay, $az, $gx, $gy, $gz);

    // Виконання запиту
    if ($stmt->execute()) {
        echo "New record created successfully";
    } else {
        echo "Error: " . $stmt->error;
    }

    // Закриття виразу
    $stmt->close();
} else {
    echo "Missing data";
}

// Закриття з'єднання
$conn->close();
?>
```

Використання підготовлених виразів (prepared statements) дозволяє захистити систему від SQL-ін'єкцій, підвищуючи безпеку даних. Виконання цього запиту забезпечує збереження отриманих даних у базі даних MySQL. У випадку успішної вставки скрипт повертає повідомлення про успіх, а у разі помилки – відповідне повідомлення про помилку, що дозволяє користувачу швидко виявити та усунути проблему.

Для забезпечення надійності та ефективності роботи серверного програмного забезпечення було впроваджено механізми логування помилок та обробки винятків. Це дозволяє відстежувати проблеми, що виникають під час роботи системи, та вчасно їх усу-

вати, підвищуючи загальну стабільність та надійність системи цифрового двійника.

**Інтеграція системи та тестування.** Інтеграція апаратних та програмних компонентів передбачає підключення сенсора MPU6050 до мікроконтролера ESP8266 або Arduino Uno R4 Wi-Fi через інтерфейс I2C, налаштування Wi-Fi з'єднання та налаштування серверного програмного забезпечення для прийому та зберігання даних. Після інтеграції системи було проведено серію тестувань для оцінки її функціональності та надійності.

Тестування включало перевірку збирання даних сенсора, їх коректну передачу на сервер, а також успішне збереження у базі даних MySQL. Під час тестування було встановлено, що система здатна стабільно збирати та передавати дані з сенсора MPU6050 з частотою 5 секунд, що дозволяє забезпечити актуальність отриманих даних для подальшого аналізу та візуалізації. Дані були успішно збережені у базі даних MySQL та були доступні для обробки та візуалізації через середовище Unity.

Для перевірки точності системи було проведено порівняльний аналіз отриманих даних з реальними фізичними характеристиками об'єкта. Використання тригонометричних функцій для обчислення кутів нахилу roll та pitch дозволило забезпечити високу точність вимірювань, що підтверджується відповідністю отриманих кутів реальним параметрам руху об'єкта. Це є важливим для створення цифрового двійника, який може точно відтворювати фізичні характеристики об'єкта в цифровому середовищі.

**Візуалізація.** Компонент візуалізації системи цифрового двійника є важливим для перетворення складних наборів даних у візуальне представлення [16]. Чітке візуальне представлення даних сенсорів дозволяє користувачам краще розуміти стан та поведінку моніторингового об'єкта в реальному часі. Одним з ключових інструментів для досягнення цієї мети є інтеграція середовища 3D-моделювання Unity, яке забезпечує створення інтерактивних та реалістичних візуальних представлень об'єктів.

Unity обирається для візуалізації рухів цифрового двійника завдяки своїй універсальності, простоті використання та потужним можливостям реального часу рендерингу. Це середовище дозволяє створювати занурюючі 3D-досвіди, які відображають орієнтацію та рухи об'єкта на основі даних, зібраних з сенсора MPU6050 та переданих з мікроконтролера ESP8266. Наприклад, при моніторингу роботизованої руки Unity може відображати її позицію та кути нахилу, надаючи чіткий огляд поточного стану віртуального двійника.

Інтеграція даних у реальному часі в Unity здійснюється через комунікаційні протоколи, такі як WebSocket або HTTP-запити, що дозволяють 3D-моделі отримувати оновлення з ESP8266. Це забезпечує анімацію моделі відповідно до змін в орієнтації та русі об'єкта, надаючи користувачам інтуїтивне розуміння його поведінки. Наприклад, коли об'єкт змінює положення, відповідні зміни автоматично відображаються на 3D-моделі в Unity, що дозволяє миттєво спостерігати за динамікою руху.

Окрім простих оновлень позиції, Unity підтримує передові техніки візуалізації, які значно покращують користувацький досвід. Наприклад, можна додати візуальні індикатори для показу критичних станів, таких як перевищення певних порогових значень roll або pitch. Реалізація змін кольору або появи попереджувальних знаків на 3D-моделі дозволяє користувачам швидко ідентифікувати небезпечні умови роботи об'єкта, підвищуючи ефективність моніторингу та прийняття рішень.

Інтерактивність в Unity дозволяє користувачам взаємодіяти з 3D-моделлю, переглядати її з різних кутів і отримувати додаткову інформацію через підказки. Це покращує залучення користувачів і дає можливість детальніше аналізувати дані, вивчаючи поведінку об'єкта.

Дизайн інтерфейсу користувача в Unity є суттєвим для ефективної візуалізації. Інтерфейс повинен бути інтуїтивно зрозумілим, організованим та естетично привабливим, щоб користувачі могли легко орієнтуватися в представлених даних. Використання кольорових схем, які відображають різні стани системи, допомагає швидко ідентифікувати ключові інформаційні точки. Наприклад, зелений може вказувати на нормальну роботу, жовтий – на обережність, а червоний – на критичні сповіщення.

Використання Unity для візуалізації в системі цифрового двійника покращує представлення даних, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень. Цей підхід підвищує зручність використання, даючи користувачам глибше розуміння стану об'єкта, що є важливим для оптимізації процесів та забезпечення безпеки систем.

## V. ВИСНОВОК

У даній роботі було розроблено прототип цифрового двійника робототехнічного пристрою, який дозволяє відтворювати рух об'єкта в реальному часі з високою точністю.

Основним завданням було вибір мікроконтролерів ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi з сенсором MPU6050 для точного збору даних про при-

скорення та кутові швидкості. Розробка програмного частини включала створення прошивки для збору та передачі даних на сервер через Wi-Fi, а також серверного програмного забезпечення на базі PHP та MySQL для зберігання та управління даними.

Проведені тестування підтвердили високу точність збору даних сенсором MPU6050 та стабільність передачі інформації на сервер. Візуалізація в Unity продемонструвала можливості створення детальних та інтерактивних моделей, що значно покращує процес аналізу даних.

Розроблений прототип цифрового двійника може бути застосований у різних галузях, від робототехніки до промислового моніторингу та демонструє можливості інтеграції сучасних апаратних та програмних технологій для створення адаптивних систем моніторингу.

В подальшому планується розширення функціональних можливостей системи шляхом інтеграції додаткових сенсорів та оптимізації програмного забезпечення для зменшення затримок у передачі даних та впровадження машинного навчання для покращення аналізу даних та виявлення аномалій у реальному часі, що дозволить створювати більш адаптивні та самонавчаючі цифрові двійники, які зможуть автоматично реагувати на зміни умов експлуатації об'єкта.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Khoshafian, S., & Rostetter, C. (2015). Digital prescriptive maintenance, Internet of Things, process of everything. *BPM Everywhere*, 1-20.
- [2] Short, M., & Twiddle, J. (2019). An industrial digitalization platform for condition monitoring and predictive maintenance of pumping equipment. *Sensors (Switzerland)*, 19.
- [3] Priyanka, E. B., Thangavel, S., Gao, X.-Z., & Sivakumar, N. S. (2021). Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques. *Journal of Industrial Information Integration*, Article 100272. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100272>
- [4] Tekinerdogan, B., & Verdouw, C. (2020). Systems architecture design pattern catalog for developing digital twins. *Sensors*, 20, 5103. <https://doi.org/10.3390/s20185103>
- [5] Paziraci, M., & Motamedi, A. (2024, August). A survey of visualization techniques for digital twins. In *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE)*, Montreal, Canada.
- [6] Dihan, M. S., Akash, A. I., Tasneem, Z., Das, P., Das, S. K., Islam, M. R., Islam, M. M., Badal, F. R., Ali, M. F., Ahamed, M. H., Abhi, S. H., Sarker, S. K., & Hasan, M. M. (2024). Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. *Heliyon*, 10, e26503. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26503>
- [7] Getting Started With ESP8266(LiLon NodeMCU V3) Complete Guide for IoT Startup With Example(as Server) [Electronic resource]. – <https://www.instructables.com/Getting-Started-With-ESP8266LiLon-NodeMCU-V3Flashi/>
- [8] Arduino Uno R4 Wi-Fi [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00087-datasheet.pdf>
- [9] Mpu6050 [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mpu6050%20datasheet&gad\\_source=1&gclid=EAIaIQobChMlxZ\\_TiOvxhgMVJFKRBR2WiQLREAAyAiAAEgJUjvD\\_BwE](https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mpu6050%20datasheet&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMlxZ_TiOvxhgMVJFKRBR2WiQLREAAyAiAAEgJUjvD_BwE)
- [10] Wire [Electronic resource]. – Access mode: <https://github.com/arduino/ArduinoCore-avr/blob/master/libraries/Wire/src/Wire.h>
- [11] MPU6050 by Electronic Cats - Library for Arduino [Electronic resource]. – Access mode: <https://github.com/ElectronicCats/mpu6050>
- [12] ESP8266WiFi [Electronic resource]. – Access mode: <https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266WiFi/src/ESP8266WiFi.h>
- [13] ESP8266HTTPClient [Electronic resource]. – Access mode: <https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266HTTPClient/src/ESP8266HTTPClient.h>
- [14] Малохвій, Е. Е. Дослідження протоколів передачі даних в умовах інтернету речей / Е. Е. Малохвій, Г. І. Молчанов, Ю. В. Паржин // Системи управління, навігації та зв'язку, 2022. – №1 – С. 66-74. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.066>
- [15] MySQL Improved Extension [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.php.net/manual/uk/book.mysql.php>
- [16] Шаптала С.В. Впровадження технології цифрових двійників для робототехніки / С.В. Шаптала, Н.О. Миронова // Управління розвитком складних систем. – 2023. – №53. – С.45-51. <https://dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.45-51>

Стаття надійшла до редакції 15.10.2024



## DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN PROTOTYPE OF A ROBOTIC DEVICE FOR MOTION REPRODUCTION IN SPAC

- BILKA D.O.** Master's Student of the Department of Information Technology of Electronic Devices, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: naulkx@gmail.com, ORCID: 0009-0007-9717-5171;
- SHAPTALA S.V.** PhD Student, Assistant of the Department of Information Technology of Electronic Devices, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: stas.shaptala@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2617-5904;
- MYRONOVA N.O.** Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology of Electronic Devices, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: natali.myronova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7484-559X;

**Purpose.** To develop a prototype of a digital twin for a robotic device capable of reproducing an object's motion in real time with high accuracy.

**Methodology.** To achieve the objective, the following methods were employed: integration of ESP8266 NodeMCU v3 and Arduino Uno R4 Wi-Fi microcontrollers with an MPU6050 sensor, firmware development using the C++ programming language in the Arduino IDE environment, creation of server-side software using PHP scripts and a MySQL database, and the development of an interactive data visualization system in Unity. Additionally, methods for data filtering and calibration were applied to ensure accuracy.

**Findings.** A digital twin prototype was developed, which accurately reproduces the movements of a physical object based on data from MPU6050 sensors. The system ensures reliable data collection and transmission from the microcontroller to the server without significant losses or distortions. The data is successfully stored in the MySQL database and is available for further analysis and visualization via interactive 3D models in Unity. Implemented mechanisms for data integrity verification and connection stability provide high reliability of the system over extended periods.

**Originality.** A novel approach to developing a digital twin has been proposed, integrating ESP8266 and Arduino Uno R4 Wi-Fi microcontrollers with an MPU6050 sensor for data collection and processing, employing real-time filtering and calibration algorithms to enhance data accuracy.

**Practical value.** The developed prototype of the digital twin for a robotic device expands the possibilities for studying and researching digital twin technologies in robotics.

**Keywords:** digital twin; robotic device; real-time data monitoring; data filtering and calibration methods; data visualization; Internet of Things.

### REFERENCES

- [1] Khoshafian, S., & Rostetter, C. (2015). Digital prescriptive maintenance, Internet of Things, process of everything. *BPM Everywhere*, 1-20.
- [2] Short, M., & Twiddle, J. (2019). An industrial digitalization platform for condition monitoring and predictive maintenance of pumping equipment. *Sensors (Switzerland)*, 19.
- [3] Priyanka, E. B., Thangavel, S., Gao, X.-Z., & Sivakumar, N. S. (2021). Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques. *Journal of Industrial Information Integration*, Article 100272. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100272>
- [4] Tekinerdogan, B., & Verdouw, C. (2020). Systems architecture design pattern catalog for developing digital twins. *Sensors*, 20, 5103. <https://doi.org/10.3390/s20185103>
- [5] Paziraei, M., & Motamedi, A. (2024, August). A survey of visualization techniques for digital twins. In *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE)*, Montreal, Canada.
- [6] Dihan, M. S., Akash, A. I., Tasneem, Z., Das, P., Das, S. K., Islam, M. R., Islam, M. M., Badal, F. R., Ali, M. F., Ahamed, M. H., Abhi, S. H., Sarker, S. K., & Hasan, M. M. (2024). Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. *Heliyon*, 10, e26503. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26503>
- [7] Getting Started With ESP8266(LiLon NodeMCU V3) Complete Guide for IoT Startup With Example(as Server)Electronic resource]. – <https://www.instructables.com/Getting-Started-With-ESP8266LiLon-NodeMCU-V3Flashi/>
- [8] Arduino Uno R4 Wi-Fi [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00087-datasheet.pdf>
- [9] MPU 6050 [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mpu-6050%20datasheet&gad\\_source=1&gclid=EAIaIQob](https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mpu-6050%20datasheet&gad_source=1&gclid=EAIaIQob)

- ChMlxZ\_TiOvxhgMVJFKRBR2WiQLREAAYAiA  
AEgJUjvD\_BwE
- [10] Wire [Electronic resource]. – Access mode:  
<https://github.com/arduino/ArduinoCore-avr/blob/master/libraries/Wire/src/Wire.h>
- [11] MPU6050 by Electronic Cats - Library for Arduino [Electronic resource]. – Access mode:  
<https://github.com/ElectronicCats/mpu6050>
- [12] ESP8266WiFi [Electronic resource]. – Access mode:  
<https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266WiFi/src/ESP8266WiFi.h>
- [13] ESP8266HTTPClient [Electronic resource]. – Access mode:  
<https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266HTTPClient/src/ESP8266HTTPClient.h>
- [14] Malokhviĭ E. E., Molchanov H. I., Parzhyn Yu. V. (2022). Doslidzhennia protokoly peredachi danykh v umovakh internetu rechei. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*. No. 1, 66-74. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.066> (in Ukrainian).
- [15] MySQL Improved Extension [Electronic resource]. – Access mode:  
<https://www.php.net/manual/uk/book.mysql.php>
- [16] Shaptala S.V., Myronova N. O. (2023). Vprovadzhennia tekhnolohii tsyfrovyykh dviihnykiv dlia robototekhniky. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*. No. 53, 45-51. <https://dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.45-51>