

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

---



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№1'2024

*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; КіберЛенінка; Наукова періодика України – проект Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського (НБУВ).*

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

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

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

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 20.06.2024 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №11 від 24.06.2024 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,63. Тираж 300 прим. Зам. №724.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№1 '2024**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2024

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

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

## FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

## MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

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

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

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

Founder and editor:

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

Journal was registered:

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

Address of editor and editorial office:

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

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

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on June 20, 2024 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.4 dated June 24, 2024). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,63. Number of copies printed 300. Rep. № 724.

# ЗМІСТ

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

**Власюк В.П.**

Реалізація керування енергопотоками підземних споживачів у залізорудній шахті.....7

**Хрипунов Г.С., Нікітін В.О., Меріуц А.В., Мінакова К.О., Зайцев Р.В., Кіріченко М.В., Шелест Т.М., Лелюк С.Ю.**

Теплові процеси у теплообмінному блоці комбінованої фотоенергетичної установки з концентрацією сонячного випромінювання.....17

**Заболотний А.П., Федоша Д.В., Дьяченко В.В.**

Алгоритм формування оптимальних схемотехнічних рішень локальних електроенергетичних систем що містять відновлювані джерела електроенергії.....26

## III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

**Малий О.Ю., Поспеева І.Є., Фурманова Н.І., Онищенко В.Ф., Залужний М.Ю., Іванов В.В.**

Методика передпроектного вибору компонентів FPV квадрокоптерного типу за заданими значеннями тяги, швидкості та часу польоту.....35

**Сіданченко В.В.**

Розробка та дослідження методу контролю аномальної поведінки процесу доменної плавки.....50

# CONTENTS

## II POWER ENGINEERING

*Vlasyuk V.P.*

Implementation of energy flow control of underground consumers in an iron ore mine.....7

*Khrypunov G.S., Nikitin V.O., Meriuts A.V., Minakova K.O., Zaitsev R.V., Kirichenko M.V., Shelest T.M., Leliuk S.Yu.*

Thermal processes in the heat exchange unit of a combined photovoltaic plant with solar radiation concentration.....17

*Zabolotnyi A.P., Fedosha D.V., Diachenko V.V.*

Algorithm for formation of optimum schematic solutions of local electrical power systems containing renewable sources of electric energy.....26

## III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

*Malyi O. Yu., Pospieieva I.Ye., Furmanova N.I., Onyshchenko V.F., Zaluzhnyi M.Yu., Ivanov V.V.*

Method of pre-project selection of components for fpv uavs the quadcopter type according to the set values of thrust, speed and flight time.....35

*Sidanchenko V.V.*

Development and study of a method for controlling anomalous behavior in the blast furnace process.....50

## РЕАЛІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОПОТОКАМИ ПІДЗЕМНИХ СПОЖИВАЧІВ У ЗАЛІЗОРУДНІЙ ШАХТІ

ВЛАСЮК В.П. аспірант, Національного університету «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна, e-mail: Email\_Valentin@ua.fm, ORCID: 0000-0003-3202-8967

**Мета роботи.** Удосконалити можливості роботи з алгоритму керування електро енергопотоками для мінімізації рівнів споживання електроенергії у електроенергетичній системі залізорудної шахти, до якої входять підземні споживачі.

**Методи дослідження.** Під час проведення дослідження застосовані методи: нечіткої редукції атрибутів грубої множини, скорочення атрибутів при швидкому розрахунку,  $K$  – середніх, базисна платформа Hadoop.

**Отримані результати.** Проведено розгляд та описано методологію реалізації алгоритму мінімізації рівнів споживання електроенергії для підземних споживачів залізорудної шахти. Розроблено та удосконалено реалізацію алгоритму Каноні з використанням функції швидкого розрахунку. Проведено розподіл на класи з використанням методу  $K$  – середніх та його реалізації у базисній платформі Hadoop. Побудовано ефективно функціонуючий і удосконалений алгоритм для керування джерелами з застосуванням мінімізації обсягів споживання електроенергії у підземних споживачах залізорудної шахти. Ключовою перевагою, для впровадження у практичне застосування даного алгоритму є його гнучкість у роботі: проявляється у забезпеченні кількох варіантів вирішення на відміну від типових математичних методів, де пропонується лише один його варіант розв'язку для визначення послідовності вирішення поставлених завдань та задач. Даний алгоритм дозволить використовувати його з множинними методами розрахунку ключових енергетичних параметрів, що допоможе зменшити надлишковий обсяг даних розрахунку обсягів враховуючи невизначеність обсягів енергоспоживання у підземних споживачів та уникнути зайвих розрахункових операцій у розгалуженій структурі даних з кількома розв'язками з чіткою їх систематизацією.

**Наукова новизна.** Проведено удосконалення практичної реалізації алгоритму функціонування, що дозволяє підвищити точність та ефективність розрахунків за рахунок усунення надлишкових рівнів споживаної потужності у підземних споживачів залізорудної шахти.

**Практична цінність.** Дане дослідження слід застосувати для превентивної оцінки та аналізу розрахованих обсягів по зменшенню рівнів споживаної потужності та їх систематизації за допомогою методів з розгалуженою структурою даних для підземних споживачів залізорудної шахти. Окреслено два можливі шляхи подальшого розвитку та удосконалення стану енергетики та енергетичного обладнання на гірничих підприємствах (в особливості на залізорудній шахті).

**Ключові слова:** алгоритм Сапору, платформа Hadoop, керування енергопотоками, підземні споживачі, smart grid, залізорудна шахта.

### I. ВСТУП

У сьогоденні виникає необхідність удосконалити розвиток значно застарілих матеріально – технічних пристроїв електроенергетичного спрямування, що особливо проглядається у підземних споживачів залізорудної шахти, що додатково продиктовано й економічним зростанням. Це має місце у кожному гірничо – металургійному підприємстві, і на пряму пов'язано зі збільшенням обсягів енергоспоживання даної категорії споживачів.

Саме тому, створюється необхідність підвищення вимог при розробці алгоритму функціонування електроенергообладнання закуплених обсягів електроенергії у енергопостачальника та їх співставлення з обсягами енергоспоживання у підземних споживачах залізорудної шахти.

По перше, це поступове нарощення обсягів потужностей, розширення кількісного та якісного скла-

ду енергетичного й електротехнічного обладнання, а також спів еквівалентне збільшення об'ємів видобутку сировини або ресурсів.

Другий шлях є інноваційним, надає можливості для економічного зростання гірничих підприємств (у тому числі й шахт) зберігаючи при цьому реальний обсяг видобутку первинних енергоносіїв, видозмінюється лише структура ресурсоспоживання за рахунок активного впровадження сучасне енергозберігального обладнання з передовими технологіями (відслідковування обсягів спожитої електроенергії відомі фірми ABB, Schneider Electric), автоматизації уже наявного енергообладнання, у тому числі й впровадження відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) і т. д.

Дана робота акцентує увагу саме на другому шляху поставленої наукової задачі.

Даний розвиток обумовлено, з одного боку - нагальними потребами енергоринку, на котрому є взає-

модія між виробниками та споживачами електроенергії, а з іншого боку наявні технічні можливості її вирішення, використавши сучасні комп'ютерні та комунікаційні технології.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Математичній реалізації алгоритмів мінімізації рівнів споживання електроенергії підземними споживачами електроенергії у залізорудній шахті у сьогодні присвячений цілий пласт публікацій. Однак дані публікації не містять уніфікованих положень про побудову алгоритмів мінімізації у обсягах споживання електроенергії залізорудними шахтами. Слід відмітити, що вони не дозволяють досить точно побудувати алгоритм мінімізації рівнів споживання електроенергії залізорудною шахтою. У роботах [1] – [3] було показано наступне: розглянуто перелік сучасних проблем, що стосуються промислових підприємств та інших об'єктів бюджетної сфери; проаналізовані переваги використання приладів обліку і контролю за обсягами споживання електроенергії; розроблена функціонуюча імітаційна модель аналізу процесами управління енергоресурсами металургійного підприємства при реалізації теоретико – методологічних положень енергозбереження; розкриті особливості інформаційної взаємодії агентів у мультиагентній системі, що дозволяє проводити детальний аналіз проєктів з метою виявлення раціональності його впровадження на підприємстві, надання можливостей реалізації гнучкого управління ресурсами; розроблено багаторівневу модель енергоспоживання металургійного підприємства, що дозволяє оцінити ефективність відібраних до реалізуванню енергозберігаючих проєктів, визначити частку кожного енергоресурсу у загальному потоці; визначити та оцінити енергоемність окремого виробництва з усього підприємства; оцінити раціональність та ефективність існуючої на підприємстві структури енергоспоживання; прогнозувати очікувані рівні енерговитрат при зміні технології виробництва, сортаменту і якості продукції різних технологій і обладнання з точки зору енергоефективності; оптимальність в управлінні потоками енергоносіїв з урахуванням зміни умов виробництва; розроблена логістика формування можливостей підвищення електроенергоефективності видобутку залізорудної сировини гірничорудними підприємствами; окреслено шляхи застосування автоматизованих керованих електроенергетичних комплексів, в систему електропостачання котрих покладено розподілену генерацію електроенергії.

Зважаючи на раніше розглянуті роботи з математично реалізації алгоритмів мінімізації рівнів споживання електроенергії підземними споживачами електроенергії у залізорудних шахтах у них не досить чітко не поставлено акцент на розробленні та впровадженні методик для мінімізації обсягів споживаної потужності для її підземних споживачів з покращенням їх ро-

боти з точки зору мінімізації піків та коливань у цілому, що дозволить уточнити профіль потужності у внутрішньопідстанційній мережі.

Порівнюючи наявний у попередніх роботах аналіз приведених алгоритмів присутнє тяжіння до інтелектуального аналізу даних тільки для одного методу вирішення поставлених наукових задач, на відміну від даного підходу заснованого на новому алгоритмові масового аналізу даних, що дозволяє підвищити точність розрахунків, а також усунути надлишкові набори даних для аналізу, що пришвидшить розрахунок і ефективність його роботи та допоможе урізноманітнити можливості застосувати множинні методи з розгалуженою структурою аналізу даних та систематизувати їх.

## III. МЕТА РОБОТИ

Мінімізація рівнів споживання електроенергії було досягнуто шляхом розгляду нового підходу у алгоритмі керування електро енергопотоками та споживанні електроенергії у електроенергетичній системі залізорудної шахти, до складу якої входять підземні споживачі.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Виникнення питань пов'язаних з енергоефективними рівнями споживання електроенергії та оптимізації її витрат виникали ще у 60 – 80 роках минулого століття. Оскільки розвиток наявної, ще тогочасної ресурсної та технологічної бази напівпровідникових елементів знаходився на достатньо низькому рівні (особливо актуальним було для підприємств гірничо – металургійного циклу виробництва), що вважали постановку даних питань не гостро необхідною. Електроенергія у споживачів, що відносяться до гірничо – металургійного циклу виробництва у їх мережах надходить з централізованої електричної мережі, а також від розподілених джерел енергії (РДЖЕ). При цьому споживання електроенергії з місцевої електромережі повинно бути мінімальним, згідно поставленої наукової задачі раніше, що обов'язково визначається економічними та екологічними вимогами.

Розглянемо на прикладі залізорудної шахти, що постачається електроенергією від центральної електричної мережі, так і від розподілених відновлювальних джерел енергії (див. рис.1).



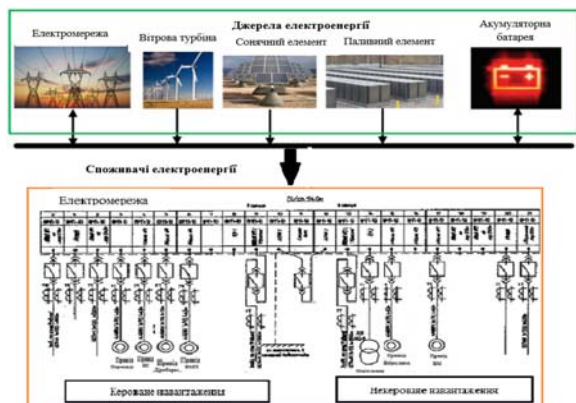


Рисунок 1. Реалізація схеми електропостачання

Коректність функціонування без збоїв для алгоритму мінімізації рівнів споживання для підземних споживачів, слід провести додатковий аналіз енергоспоживання для блоків електроенергетичного обладнання залізорудної шахти (сюди входить: насосні станції, дробарки, опрокиди, вібролюки, внутрішнє шахтне обладнання, вентилятори місцевого провітрювання, навантажувальні та бурильні машини), щоб забезпечити енергозбереження та скоротити відповідні обсяги споживання енергії.

Використаємо наукову методологію поділу на дві частини.

Перша її частина: визначає сталість значень у контрольних робочих параметрах обсягів споживання електроенергії для блоків у залізорудній шахті для типових умов її навантаження (номінальне) в основу котрого, уже покладемо модернізований алгоритм К – середніх.

У другій частині: використовуємо опорні вектори, щоб визначити коефіцієнти чутливості для різних робочих параметрів чистих обсягів споживання електроенергії з різними умовами навантаження залізорудної шахти (номінальне або аварійне).

Даний метод аналізу є: "нечіткої редукції атрибутів грубої множини" додатково до нього додамо ще й "метод редукції мінімалістичних властивостей", зменшення складності у наборі даних.

Застосування моделі віртуальної електростанції є досить сучасною та інноваційною технологією для енергосистеми залізорудної шахти, що може ефективно працювати у процедурі керування складовими частинами традиційної та відновлювальної енергетики, щоб досягти раціональності у розподілі наявних обсягів електроенергії для умов обмеженості та змінності обсягів доступних ресурсів (відсутності сонця, вітру або різке збільшення активності і т. і.).

Не забуваймо й про впровадження у віртуальну електростанцію диспетчерської інформаційної системи та розподіленої системи управління, що зберігає величезні обсяги даних по спожитим та резервним

обсягам електроенергії у електростанціях даного типу.

Впровадження у математичну модель нечітких та грубих множин "знижує" обсяги наборів даних та зменшує значення їх атрибутів, використовуючи уже аналогічні переваги до сформованого масиву даних, що заснований на нечіткості та впорядкованості.

Верхні та нижні апроксимаційні множини для нечіткої грубої множини визначаємо наступним чином [4] – [19]:

$$u_{\underline{P}X}(F_i) \inf \max \{1 - u_{F_i(x)}, u_x(x)\}, \forall i \quad (1)$$

$$u_{\overline{P}X}(F_i) = \inf \max \{1 - u_{F_i(x)}, u_x(x)\}, \forall i \quad (2)$$

де  $U$  – непорожня область, а  $F_i$  - клас еквівалентності рішення  $F_i \in U / P = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ .

Нечітка позитивна область математичної моделі для нечітких та грубих множин визначається наступним чином:

$$u_{pos_{P(Q)}}(x) = \sup_{X \in U/P} u_{\overline{P}X}(x) \quad (3)$$

де  $P$  – умовним атрибутом, а  $Q$  – атрибут рішення.

Дана формула відображає здатність умовного означення та охарактеризувати ознаку рішення. Згідно з відповідними визначеннями для нечіткої позитивної області, ступінь залежності атрибутів моделі нечітких та грубих множин визнають так:

$$\gamma_P(Q) = \frac{u_{pos_{P(Q)}}(x)}{u} = \frac{\sum_{x \in U} u_{pos_{P(Q)}}(x)}{u} \quad (4)$$

Метою математичного методу редукції атрибутів є пошук найпростішого набору характеристик умовного атрибуту до атрибуту рішення, а потім видалення надлишкового умовного атрибуту.

Алгоритм скорочення атрибутів QuickReduct є класичним математичним методом, котрий використовується для досягнення мети даної статті. Він є легким для вивчення завдяки своїй швидкодії та простоті пошуку.

Його принцип роботи лежить у виборі порожньої множини  $R$ , а потім додаванні до множини  $R$ , тих атрибутів, які збільшують коефіцієнти залежності  $\gamma_P(D)$ , до поки  $\gamma_P(D)$  не досягне свого максимального значення.

Блок – схема алгоритму редукції атрибутів виглядає наступним чином (див. рис. 2).

```

1:  $R \leftarrow \{\}, \gamma_{best} \leftarrow 0, \gamma_{prev} \leftarrow 0$ 
2:  $Do$ 
3:  $T \leftarrow R$ 
4:  $\gamma_{prev} \leftarrow \gamma_{best}$ 
5:  $\forall x \in \{C - R\}$ 
6: if  $\gamma_{R \cup \{x\}}(D) > \gamma_T(D)$ 
7:    $T \leftarrow R \cup \{x\}$ 
8:    $\gamma_{best} \leftarrow \gamma_T(D)$ 
9:  $R \leftarrow T$ 
10: until  $\gamma_{best} = \gamma_{prev}$ 
11: return  $R$ 

```

**Рисунок 2.** Зовнішній вигляд алгоритму скорочення атрибутів QuickReduct

Реалізація алгоритму Сапору

Даний алгоритм використовує масив даних, що виконує розподіл точок вхідних даних на кілька кластерів, які перекривають один одного за допомогою додаткового математичного методу вимірювання відстані між ними, а точки у Сапору обчислюються методом з високою точністю розрахунків.

Визначення 1 алгоритму Сапору: Є заданий набір даних  $F = \{f_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $\forall x_i \in F$ , або  $c_i | \exists |x_i - c_j| \leq D_1, c_j \subseteq F, i \neq j$ , тоді множина  $x_i$  має назву множини Сапору,  $c_j$  є центральною точкою покриття Сапору,  $D_1$  є напівдіаметром набору Сапору.

Визначення 2. Центральна точка Сапору: Є заданий набір даних  $F = \{f_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $\forall x_i \in F$  або  $c_n | \exists |x_i - c_n| \leq D_1, D_2 < D_1, c_n \subseteq F, i \neq n$  тоді  $c_n$  буде множиною довільного набору точок Сапору.

Визначення К – середніх, нагадує класичний алгоритм навчання без нагляду, що базується на методах кластеризації розділів. Після випадкового вибору  $k$  точок у наборі вихідних даних, початкові значення цих точок приймаються за центр кожного кластеру. Потім обчислюється відстань між нецентральними точками даних та центром кожного кластеру, і точки даних, що відносяться до найближчого до них кластеру.

Після згрупування точок, виконується обчислення середнього значення кожного кластеру й знову обирається центральна точка кожного кластеру. Даний процес буде повторюватись до того часу, поки цільова критеріальна функція не стане збіжною.

Критеріальна функція визначається наступним чином:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} (x - \bar{x}_i)^2 \quad (5)$$

де  $E$  – сума квадратів Евклідових відстаней між

кожною точкою даних та відповідним центром кластеру,  $x$  – точка у просторі даних, а  $\bar{x}_i$  – середнє арифметичне для кожного кластеру.

Використовуючи критеріальну функцію, згенеровані кластери будуть максимально компактними, тоді як різні кластери можуть бути максимально незалежними.

Підрахунок кількості кластерів, що обчислюються за допомогою  $K$  – середніх, у даній роботі використовується дисперсійна функція (сума середніх квадратів), що переводить у векторну форму дані у  $K$  – середніх.

Окрім того вибрані  $k$  точки даних розглядаються як центри векторів, а через розрахункові формули визначаються наступним чином:

$$\vec{x}_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} \vec{x} \quad (6)$$

$$RSS_k = \sum_{x \in C_i} |x - \vec{x}_i|^2 \quad (7)$$

$$RSS = \sum_{k=1}^k RSS_k \quad (8)$$

$RSS_k$  – є відстанню між кожною точкою даних у класі  $k$  та відповідним центром, і  $RSS$  – являє собою суму  $RSS_k$  для усіх  $k$  класів.

Функції Hadoop Distributed File System (HDFS) та MapReduce є головними та складають відповідну основу для цієї платформи.

Перша – виконує операції по збереженню масивів для великого обсягу даних (дані опрацьовуються переважно у режимі реального часу); друга - займається опрацюванням та обчисленням накопичених обсягів масивів даних.

Дана платформа демонструє надвисоку пропускну здатність та автоматично повертає функціонування алгоритму у коректну роботу у разі збоїв функціонування (характеризується відмовостійкістю).

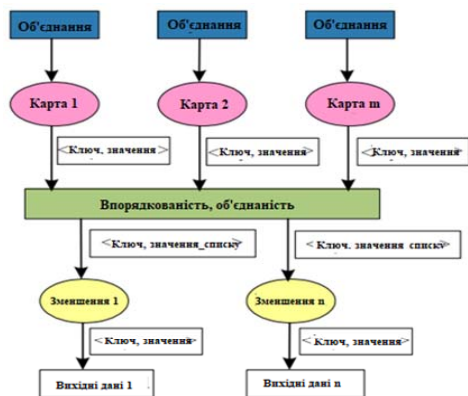
Для підземних споживачів у залізорудній шахті він успішно застосовується для опрацювання й роботи з великими обсягами даних (сюди входить: обсяг споживання електроенергії, ккд енергосистеми шахти, реактивна потужність,  $\cos\phi$ ,  $\tan\phi$  і т. п.).

Основними функціями даного фреймворку є: мапування та редукція. Блоки даних вводяться і виводяться: у вигляді "ключ, значення". Вихідні значення блоків даних обчислюємо за допомогою незалежної і паралельної функції Map, а потім дані вихідні значення впорядковуємо і об'єднуємо.

Результатами виконання даних операцій є ключові значення певних величин, які при ранжуванні їх значень беруться, як вхідні значення функції Reduce, що поступово сортується по зменшенню їх значень і виводяться.

Обчислювальний процес функції MapReduce по-

казано на рисунку 3:



**Рисунок 3.** Алгоритм обчислювального процесу при застосуванні функції MapReduce

Алгоритм зображений на рисунку 3 потребує використання алгоритму FMK (удосконалений алгоритм K – means математичним методом нечіткої грубої множини при застосуванні функції MapReduce), щоб отримати еталонне значення контрольованого експлуатаційного параметру за оптимальних умов, що буде тісно пов'язаний з витратою електроенергії підземними споживачами у залізничній шахті.

*Даний алгоритм працює наступним чином:* скорочується кількість атрибутів для кожного параметру роботи, використовується для цього модель побудована з застосуванням бази математичного методу нечітких та грубих множин.

Після того, як "атрибути - кандидати" були скорочені, розраховується найпростіший набір атрибутів (таким чином модель перетворюється у модель програмування) функції MapReduce, що реалізує паралельну обробку уже для покращеного алгоритму K – середніх. Потім визначається центральна точка оптимального кластеру для кожного операційного параметру окремо.

*Опишемо реалізацію покращеного алгоритму FMK для K – середніх:*

1. Створюємо таблицю рішень для обсягів використання енергії підземними споживачами залізничної шахти. Розглядаємо різні фактори, що можуть вплинути на обсяги її споживання, розділяємо умови її експлуатації відповідно до зовнішніх умов, наприклад: електричного навантаження, вологості і температури робочого приміщення.

Береться норма споживання електроенергії у якості атрибуту рішення, а контрольовані робочі параметри, які мають тісний зв'язок з першими, як атрибути умови.

2. Уточнюється нечітка функція незалежності відповідно до атрибутів кожного параметру та перетворює дані параметри у набір нечітких даних.

3. Зменшуються експлуатаційні параметри, які впливають на витрату електроенергії, за допомогою

методу QuickReduct. Після обчислення найпростішого набору атрибутів обчислюється важливість кожного атрибуту умови для норми витрати енергії.

4. На етапі переходу від функції Map до алгоритму Scanory перетворюється найпростіший набір атрибутів у формі "ключ - значення" та надсилаються дані значення ключів до функції m у Map. Потім обчислюється поріг відстані для кожної точки даних і порівнюються відстані з D1 і D2. Після того, як вони будуть класифіковані, ці екземпляри за допомогою ітерацій додаються до набору у алгоритм Scanory безпосередньо.

5. У третьому рекуренті алгоритму Scanory об'єднуються та обчислюються результати етапу Map і сформується множина Q; далі обробляється множина Q за допомогою алгоритму Scanory.

Повторюються наведені вище кроки доти, доки набір даних не стане порожнім, а потім отримуємо кластер K та його центральну точку, яку візьмемо за вхідне значення системи для удосконалення алгоритму K – середніх.

6. На етапі переходу від функції Map до алгоритму K – середніх перетворюється на скорочений новий набір даних у форму "ключ - значення" і надсилається він до m у функції Map.

Обчислюється відстань між даними кожного вузлу та центрами кожного кластеру, а потім відносимо ці вузли до найближчого до них кластеру. Обчислюємо типи кожного кластеру та виводимо їх у вигляді "ключ - значення".

7. Функцію Combine використовуємо для поділу вихідного значення функції Map, а потім об'єднуємо дані, що належать до одного кластеру. Підсумовуємо відповідні розмірності даних в одному кластері та підраховуємо кількість об'єктів даних.

Обчислені результати виводимо у вигляді "ключ - значення". "Ключ" – це тип кластеру, тоді як "значення" – відповідна розмірність даних і накопичена кількість об'єктів даних.

8. На етапі Reduce K – means отримуємо вихідне значення функції Combine, після чого проводимо аналіз суми відповідної розмірності даних у кожному кластері, а також загальну кількість об'єктів даних. Таким чином, буде отримано нові центри для кластерів, і проведено новий цикл ітерації до тих пір, поки дана функція не стане східною.

9. Аналіз чутливості до загальних обсягів енергоспоживання підземних споживачів залізничної шахти виконаємо за допомогою машини опорних векторів (SVM).

Чутливість енергоспоживання підземних машин та електротехнічних комплексів у залізничній шахті відноситься до категорії змінного обсягу енергоспоживання, що викликано відхиленням значення робочого параметру від еталонного або проектного значення.

Розрахувавши часткову похідну швидкості

споживання електроенергії для кожного параметру, а потім отримання характеристики відгуку, слід проаналізувати та підтвердити чутливість кожного робочого параметру до рівнів споживання енергії.

Створимо вибірку сукупність для дослідження у наступному вигляді:

$\vec{D}_1 = \{(\vec{x}_1, z_1), (\vec{x}_2, z_2), \dots, (\vec{x}_i, z_i), \dots, (\vec{x}_n, z_n)\}$  для підземних споживачів електроенергії параметри обсягів споживання та експлуатації:  $\vec{x}_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{im}\}^T$  є векторами впливу на  $i$  – й елемент даної сукупності,  $i=1,2,\dots,n$ ,  $n$  – кількість вибірок,  $j=1,2,\dots,m$ ,  $m$  – кількість відповідних робочих параметрів.

Наступним кроком є встановлення функції математичного опису обсягів споживання електроенергії підземними споживачами залізорудної шахти й кожного її експлуатаційного параметру у наступному вигляді:

$$z = f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (9)$$

У даному випадку низький простір відображається у вигляді високого простору і таким чином буде уже створено лінійну регресійну модель, де на її базі буде побудована математична модель для обсягів споживання електроенергії підземними споживачами залізорудної шахти її експлуатаційних параметрів:

$$z = f(x) = \sum_{i=1}^k (a_i - a_i^*) k(x_i, x) + b \quad (10)$$

де  $a_i$  і  $a_i^*$  – будуть множники Лагранжа, а  $k(x_i, x)$  буде функцією його ядра.

Розрахунок коефіцієнту чутливості до норми споживання обсягів підземними споживачами залізорудної шахти буде розраховано з врахуванням лінійної функції ядра згідно формули:  $k(x_i, x) = x_i^T x$ :

$$f(x) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (a_i - a_i^*) x_{ij} + b \quad (11)$$

Обчислення часткової похідної для рівняння (8) і отримуємо впливовий параметр  $x_j$  обсягів споживання електроенергії для підземних споживачів залізорудної шахти:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) x_{ij} \quad (12)$$

Значення параметру  $\frac{\partial f(x)}{\partial x}$  безпосередньо вказує

на коефіцієнт чутливості норми обсягів споживання підземними споживачами залізорудної шахти до параметру  $x_j$ , на основі котрого можна побудувати алгоритм до аналізу чутливості споживання електроенергії при електропостачанні підземних споживачів залізорудної шахти:

$$\Delta z = \sum_{j=1}^m [\sum_{i=1}^n [(a_i - a_i^*) x_{ij}] \Delta x_j] \quad (13)$$

Ефективність методів математично – аналітичного програмування для планування спожитих та залишкових обсягів електроенергії для підземної електроенергетичної системи залізорудної шахти з урахуванням невизначеності їх точності значень і складності у реалізації є необхідною та достатньою умовою для побудови справно та без збоїв функціонуючого алгоритму.

Алгоритм керування джерелами і підземними споживачами електроенергії залізорудної шахти наведено на рисунку 4.

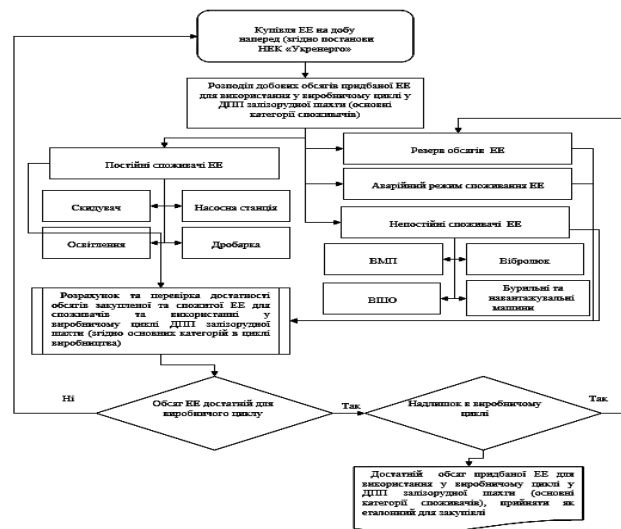


Рисунок 4. Алгоритм обчислювального процесу при застосуванні функції MapReduce

Алгоритм функціонує наступним чином:

Відбувається закупівля певних обсягів електроенергії на добу наперед з похибкою врахування  $\pm 5\%$ , далі відбувається розподіл усіх добових обсягів придбаної електроенергії на добу наперед для виробничого циклу залізорудної шахти (постійні та непостійні), залишкові обсяги придбаної електроенергії від доби наперед у свою чергу мають розподіл на резервні, аварійні, непостійні.

До категорії постійних споживачів згідно даного алгоритму (див. рисунок 4) належать: скидувач, насосна станція, вентилятори місцевого провітрювання, дробарка.

Подальший розподіл обсягів електроенергії перекидається на непостійних споживачів, котрі включають: освітлення, вібролюк, внутрішньо шахтне обладнання, бурильні та навантажувальні машини.

Наступною дією та перевіркою у даному алгоритмі є розрахунок та перевірка обсягів закупленої та спожитої електроенергії для споживачів та використанні у виробничому циклі залізорудної шахти на добу наперед (згідно з визначеним раніше розподілом у основні категорії у циклі виробництва).

Далі накладається умовний блок з перевіркою на достатність обсягів закупленої електроенергії на добу наперед для здійснення усього виробничого циклу для залізорудної шахти (якщо відповідь "так" – увесь залишок надлишків після усіх проходжень робочого циклу на залізорудній шахті) направляємо у резервні обсяги електроенергії й переходимо до блоку відповідального за прийняття даного обсягу електроенергії (враховуючи основні категорії споживачів) за еталонний для подальших її закупівель на майбутнє, якщо "ні" – повертаємось до першого блоку для закупівлі ще обсягів на добу наперед з урахуванням раніше зазначених у даному алгоритмі раніше.

Зазначимо, що кожна ітерація даного алгоритму розглядається, як серія певної послідовності початкових рішень. Основними перевагами для даного алгоритму є: гнучкість, а також спосіб роботи, оскільки вони забезпечують кілька варіантів вирішення на користь того, щоб визначити послідовність вирішення, як це виконується у типових математичних методах.

Дані підходи дозволяють системі енергетичного менеджменту (СЕМ) приєднаної до мережі живлення залізорудної шахти, покращити її роботу з точки зору мінімізації піків та коливань в обсягах спожитої електроенергії, а також профілю потужності, що має обмін з внутрішньопідстанційною мережею.

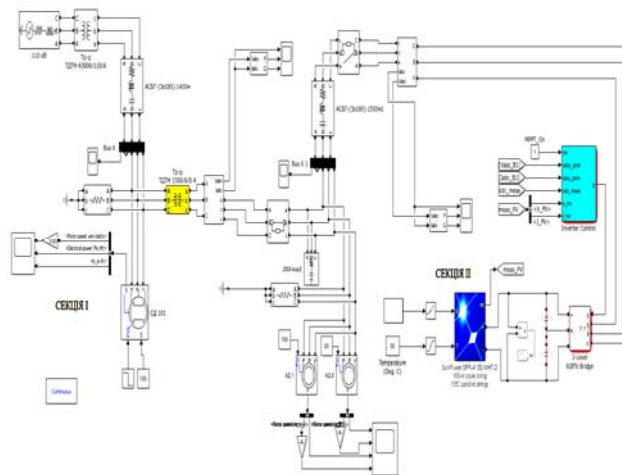
По – перше, даний метод функціонування в алгоритмі керування енергопотоками виконує попередню обробку контрольованих операційних параметрів на основі теорії нечітких і грубих множин.

По – друге, алгоритм К – середніх покращується алгоритмом Санору, та реалізується новий паралельний алгоритм кластеризації, має назву FMK – середніх.

Даний алгоритм дозволяє отримати еталонне значення для контрольованого експлуатаційному параметру за оптимальних умов, що тісно пов'язаний з витратою електроенергії у залізорудній шахті.

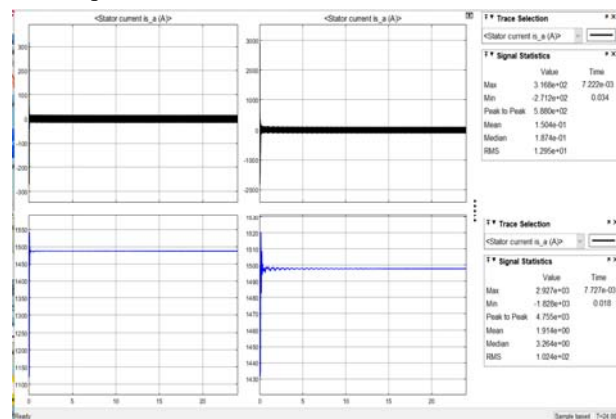
Слід урахувати, що даний метод враховує чутливість кожного параметру до споживання електроенергії при різних робочих навантаженнях у залізорудній шахті на основі векторної технології.

Практична реалізація роботи даного алгоритму представлена на рис. 5

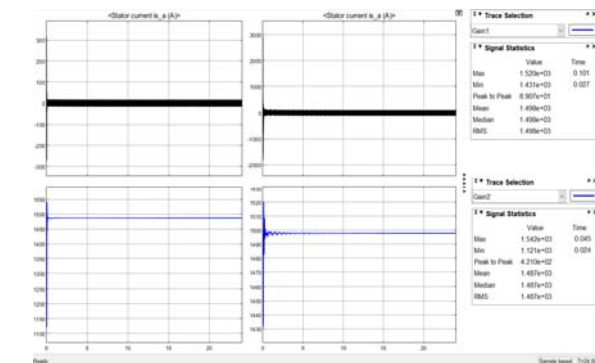


**Рисунок 5.** Модель керування енергопотоками залізорудної шахти з мінімізацією рівнів споживання електроенергії підземними споживачами

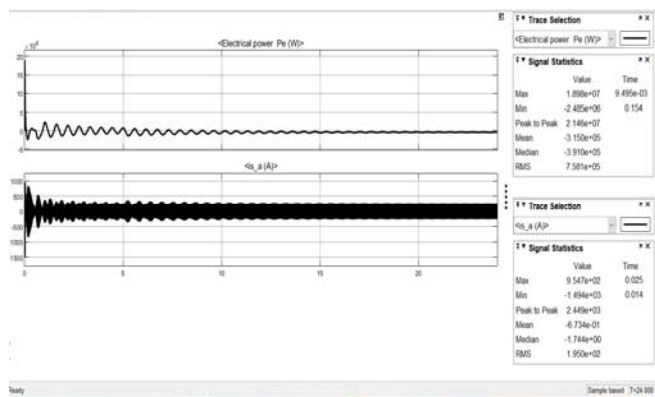
Осцилограми відпрацювання автоматизованої моделі залізорудної шахти з мінімізацією рівнів споживання електроенергії підземними споживачами дивись рис. 6–8.



**Рисунок 6.** Графіки керування електроенергопотоками з урахуванням підвищеної ефективності функціонування енергосистеми залізорудної шахти і її підземних споживачів



**Рисунок 7.** Графіки енергетичних параметрів від схеми живлення залізорудних споживачів і її підземних споживачів з врахуванням алгоритму мінімізації рівнів споживання



**Рисунок 8.** Графіки роботи шахтної мережі з урахуванням алгоритму мінімізації споживання енергії її підземними споживачами

У результаті проведення моделювання при застосуванні нового підходу у реалізації алгоритму керування електроенергопотокми при споживанні електроенергії у електроенергетичній системі залізорудної шахти з її підземними споживачами значення обсягів її споживання виявились вищими на 0,5%, що знаходиться у межах допустимої похибки при застосуванні апаратних засобів моделювання на кшталт Matlab Simulink. Даний крок надає рекомендаційні поради, стосовно оптимізації та налагодження енергоблоків електричних споживачів у залізорудній шахті [4] – [19].

### ВИСНОВКИ

У роботі детально розглянуто та описано методологію реалізації алгоритму мінімізації рівнів споживання електроенергії у підземних споживачів залізорудної шахти, в основу якого покладено реалізацію алгоритму Сапору з функцією QuikReduct, розподілення на класи за допомогою методу К – середніх та їхньої реалізації у базисній платформі Nadoor.

Чутливість енергоспоживання машин та електротехнічних комплексів у залізорудній шахті відноситься до категорії змінного обсягу електроенергії, що викликане відхиленням значення робочого параметру від еталонного або проектного значення.

Виконано побудову практичного функціонування алгоритму для керування джерелами і мінімізацією обсягів споживання електроенергії підземними споживачами залізорудної шахти.

Розглянуто методологію роботи автоматизованої моделі залізорудної шахти з мінімізацією її рівнів споживання у підземних споживачах.

Основними перевагами для даного алгоритму є: гнучкість, а також спосіб роботи, оскільки він забезпечує кілька варіантів вирішення на користь, визначення послідовності вирішення, як це виконується у типових математичних методах.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Олійник Ю.С. (2016). Управління енергозбере-

женням та енергоспоживанням на промислових та господарських підприємствах. *Research gate*, 1, 88-89.

[2] Кійко, С.Г., Дружинін, Є.А., Прохоров, В.О. (2020). Модель планування енергоспоживання металургійного підприємства. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 1, 59, 27-32. doi: 10.26906/SUNZ.2020.1.027.

[3] Сінчук, О.М., Купін А.І., Сінчук І.О., Барановська М.Л., Будніков К.І. До розробки алгоритму енергоефективного керування електроенергетичним комплексом з розділеною генерацією електричної енергії в умовах залізорудних шахт, 2021. *Вісник Криворізького національного університету*, 53, с. 118-126, doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-118-126.

[4] Соловей О.І., Ситник О.О., Розен В.П. та ін. Техніко – економічні розрахунки систем електропостачання промислових підприємств. 2012, Черкаси. ЧДТУ, 251.

[5] Журахівський А.В., Жежеленко І.В. Оптимізація електроенергетичних систем. 2000, Львів, Маріуполь. Видавництво Приазовського державного технічного університету ISSN 1997-9266, 109.

[6] Boyd, J (2013). An internet – inspired electricity Grid. *Spectrum IEEE*, 1, 12-13.

[7] Huang, A., Heydt G., Dale, S., & Crow M. (2008). Energy internet – future renewable electric delivery and management (FREEDM) systems. *IEEE Power Electronics Society News letter*, 4, 8-9.

[8] Denysiuk, S., Sokolovskyi, P. (2018). Analysis of the variable generation function on the step of transition to intellectual networks Smart Grid. *Electrification of transport*, 15, 31-42.

[9] Denysiuk S., Tarhonskyi V., Artemiev M. (2018). Local electrical energy systems with active consumer: methods of consumption and algorithm of their functioning. *Power engineering: economics, technique, ecology*, 3, 7-22.

[10] Strzelecki R., Benysek G. 2010. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks. *Springer*, 414.

[11] Fu, P., Wang, N.L., Wang, L.G., Morosuk, T., Tsatsaronic, G.B. (2016). Performance degradation diagnosis of thermal power plants: A method bases on advanced exergy analysis. *Energy Convers Management*, 130, 219-229. CrossRef.

[12] Arora, P., Varshney, S. (2016). Analysis of K – Means and K – Medoids algorithm for big data. *Procedia Computer Science*, 78, 507-512. CrossRef.

[13] Gerhard, Z., Usman, H., Max, B., & Thomas, L. (2015). Sanitation and analysis of operation data in energy systems. *Energies*, 8, 12776-12794.

[14] Hadayegharast, S., Soltani Nejad, Farsangi, A., & Shayanfar, H. (2019). Day – ahead stochastic multi – objective economic/emission operational scheduling of a large scale virtual power plant. *Energy*, 172,

630-646.

- [15] Lukovic, S., Kaitovic, I., Bondi, U. (2015). Adopting system engineering methodology to virtual power systems design flow. *Faculty of Informatics - University of Lugano*, 4, 1-8.
- [16] Quian, J., Wang, P.H., Li, L. (2007). Application of clustering algorithm in target – value analysis for boiler operating parameter. *Proceeding CSEE*, 27, 71-74.
- [17] Brand, E.L., Vosloo, V., Mathews E. (2015). Automated energy efficiency – syproject identification in the gold mining industry. *Proceeding of the 13<sup>th</sup> Conference on the Industrial and Commercial use of*

*Energy*, 17-22. DOI: 10.1109/ICUE.2015.7280241.

- [18] Thillainathan, L., Dipti, S., Vanessa, K.W. (2014). Demand side management of smart grid: Load shifting and incentives. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6 (03), 31-36.
- [19] Moslem, U., Mohd F.R., Syahirah A.H. & Tan, C.K. (2018). A review on peak load shaving strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3323-3332.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2024

## IMPLEMENTATION OF ENERGY FLOW CONTROL OF UNDERGROUND CONSUMERS IN AN IRON ORE MINE

VLASYUK V.P. postgraduate student, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

**Purpose.** To enhance the capabilities of the power flow control algorithm to minimize the level of electricity consumption in the electric power system of an iron ore mine, this includes underground consumers.

**Methodology.** The research was conducted using the following methods: fuzzy attribute reduction of a coarse set, attribute reduction by QuickReduct, K-means, and the Hadoop platform.

**Findings.** The article considers and describes the methodology for implementing an algorithm for minimizing the levels of electricity consumption for underground consumers of an iron ore mine. An algorithm implementation of the Kanopy algorithm using the fast calculation function has been developed and improved.

Classification using the K-means method and its implementation in the basic Hadoop platform was carried out. An efficiently functioning and improved algorithm for source control has been built to minimize the volume of electricity consumption in underground consumers of an iron ore mine. The key advantage of this algorithm for practical application is its flexibility in operation: it provides several solution options, unlike typical mathematical methods, where only one solution option is offered to determine the sequence of solving the tasks and problems. This algorithm will allow its use with multiple methods for calculating key energy parameters, which will help reduce the excessive amount of data for calculating volumes given the uncertainty of energy consumption by underground consumers and avoid unnecessary calculation operations in a branched data structure with several solutions with a clear systematization.

**Originality.** The paper improves the practical implementation of the functioning algorithm, which allows increasing the accuracy and efficiency of calculations by eliminating excessive levels of power consumption by underground consumers of an iron ore mine.

**Practical value.** This research should be applied to the preventive assessment and analysis of the calculated volumes for reducing power consumption levels and their systematization using methods with a branched data structure for underground consumers of an iron ore mine. Two possible ways of further development and improvement of the state of energy and power equipment at mining enterprises (especially at an iron ore mine) are outlined.

**Keywords:** Canopy algorithm, Hadoop platform, energy flow management, underground consumers, smart grid, iron ore mine.

### REFERENCES

- [1] Olijnik Ju.S. (2016). Upravlinnja energozberezhenjam ta energospozhivannjam na promislovih ta gospodars'kih pidpriemstvah. *Research gate*, 1, 88-89. UDK 621.311.
- [2] Kijko, S.G., Druzhinin, E.A., Prohorov, V.O. (2020). Model' planuvannja energospozhivannja metalurgijnogo pidpriemstva. *Sistemi upravlinnja, navigacii ta zv'jazku*, 1, 59, 27-32. doi: 10.26906/SUNZ.2020.1.027.
- [3] Sinchuk, O.M., Kupin A.I., Sinchuk I.O., Baranovska M.L., Budnikov K.I. Do rozrobki algoritmu energoefektivnogo keruvannja elektroenergetichnim kompleksom z rozdilenuju generacieju elektrichnoi energii v umovah zalizorudnih shaht, 2021. *Visnik Krivoriz'kogo nacional'nogo universitetu*, 53, s. 118-126, doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-118-126.
- [4] Solovej O.I., Sitnik O.O., Rozen V.P. ta in. Tehniko – ekonomichni rozrahunki sistem elektropostachannja promislovih pidpriemstv. 2012, Cherkasi. ChDTU, 251.
- [5] Zhurahiv'skij A.V., Zhezhelenko I.V. Optimizacija elektroenergetichnih sistem. 2000, L'viv, Mariupol'. Vidavnicтво P'riazov'skogo derzhavnogo tehničnogo universitetu ISSN 1997-9266, 109.
- [6] Boyd, J (2013). An internet – inspired electricity Grid. *Spectrum IEEE*, 1, 12-13.

- [7] Huang, A., Heydt G., Dale, S., & Crow M. (2008). Energy internet – future renewable electric delivery and management (FREEDM) systems. *IEEE Power Electronics Society News Letter*, 4, 8-9.
- [8] Denysiuk, S., Sokolovskyi, P. (2018). Analysis of the variable generation function on the step of transition to intellectual networks Smart Grid. *Electrification of transport*, 15, 31-42.
- [9] Denysiuk S., Tarhonskyi V., Artemiev M. (2018). Local electrical energy systems with active consumer: methods of consumption and algorithm of their functioning. *Power engineering: economics, technique, ecology*, 3, 7-22.
- [10] Strzelecki R., Benysek G. 2010. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks. *Springer*, 414.
- [11] Fu, P., Wang, N.L., Wang, L.G., Morosuk, T., Tsatsaronic, G.B. (2016). Performance degradation diagnosis of thermal power plants: A method bases on advanced exergy analysis. *Energy Convers Management*, 130, 219-229. CrossRef.
- [12] Arora, P., Varshney, S. (2016). Analysis of K – Means and K – Medoids algorithm for big data. *Procedia Computer Science*, 78, 507-512. CrossRef.
- [13] Gerhard, Z., Usman, H., Max, B., & Thomas, L. (2015). Sanitation and analysis of operation data in energy systems. *Energies*, 8, 12776-12794.
- [14] Hadayeghparast, S., Soltani Nejad, Farsangi, A., & Shayanfar, H. (2019). Day – ahead stochastic multi – objective economic/emission operational scheduling of a large scale virtual power plant. *Energy*, 172, 630-646.
- [15] Lukovic, S., Kaitovic, I., Bondi, U. (2015). Adopting system engineering methodology to virtual power systems design flow. *Faculty of Informatics - University of Lugano*, 4, 1-8.
- [16] Quian, J., Wang, P.H., Li, L. (2007). Application of clustering algorithm in target – value analysis for boiler operating parameter. *Proceeding CSEE*, 27, 71-74.
- [17] Brand, E.L., Vosloo, V., Mathnews E. (2015). Automated energy efficiency – syproject identification in the gold mining industry. *Proceeding of the 13<sup>th</sup> Conference on the Industrial and Commercial use of Energy*, 17-22. DOI: 10.1109/ICUE.2015.7280241.
- [18] Thillainathan, L., Dipti, S., Vanessa, K.W. (2014). Demand side management of smart grid: Load shifting and incentives. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6 (03), 31-36.
- [19] Moslem, U., Mohd F.R., Syahirah A.H. & Tan, C.K. (2018). A review on peak load shaving strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3323-3332.



## ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ У ТЕПЛООБМІННОМУ БЛОЦІ КОМБІНОВАНОЇ ФОТОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З КОНЦЕНТРАЦІЄЮ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

- ХРИПУНОВ Г.С.** д.т.н., проф., професор кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: khrip@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6448-5938;
- НІКІТІН В.О.** науковий співробітник кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: bicmor@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2644-8340;
- МЕРІУЦ А.В.** к.ф.-м.н., доц., доцент кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: meriuts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4176-2530;
- МІНАКОВА К.О.** к.ф.-м.н., доц., провідний науковий співробітник кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: kseniia.minakova@khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8869-1082;
- ЗАЙЦЕВ Р.В.** д.т.н., проф., завідувач кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: roman.zaitsev@khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2286-8452;
- КІРІЧЕНКО М.В.** к.т.н., с.н.с., доцент кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: mykhailo.kirichenko@khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4847-506X;
- ШЕЛЕСТ Т.М.** к.ф.-м.н., доц., доцент кафедри фізики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: tetiana.shelest@khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8116-6189;
- ЛЕЛЮК С.Ю.** аспірант кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: stanislav.leliuk@infiz.khpri.edu.ua, ORCID: 0009-0007-4897-1585;

**Мета роботи.** Провести розрахунок енергетичного балансу фотоенергетичної установки для роботи в умовах концентрованого сонячного випромінювання, розробити конструкцію теплообмінного блоку з «мікро» каналами.

**Методи дослідження.** Аналітичні дослідження за допомогою критеріальних рівнянь гідродинаміки, створення та дослідження комп'ютерних моделей на основі рівнянь теплового балансу.

**Отримані результати.** На основі аналізу теплових процесів запропоновано конструкцію теплообмінного блоку оснащеного «мікро каналами» для комбінованої фотоенергетичної установки, що розрахована на роботу в умовах концентрованого сонячного випромінювання. Показано, що в такій конструкції створюється перехідний режим потоку рідини, що охолоджує, що дозволяє ефективно охолоджувати сонячні елементи в умовах концентрованого сонячного випромінювання. На основі результатів досліджень запропоновано шляхи покращення конструкції теплообмінного блоку для оснащення фотоенергетичної установки, розрахованої на роботу в умовах порушення типової енергоінфраструктури. Показано, що для зменшення перепаду температури за площею  $SE$  можливе перенесення входу теплоносія в центр і двох виходів на протилежних краях блоку.

**Наукова новизна.** Вперше запропонована конструкція радіатора теплообмінного блоку на основі «мікроканалів», що забезпечує перехідний режим потоку з коефіцієнтом теплообміну між теплоносієм та верхньою пластиною радіатора  $hf \sim 10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$  при швидкості потоку у проміжках між пластинами  $\sim 2.1 \text{ м/с}$ .

**Практична цінність.** Виконано оцінку ефективності, теплових та електричних характеристик комбінованої фотоенергетичної установки з концентрацією сонячного випромінювання. Запропоновано використання розробленої конструкції теплообмінного блоку для оснащення фотоенергетичної установки для роботи в умовах порушення типової енергоінфраструктури. Проведено попередній розрахунок теплових та електричних

параметрів фотоенергетичної установки, оснащеної багатокаскадними сонячними елементами на основі арсеніду галію та теплообмінним блоком із «мікроканалами».

**Ключові слова:** сонячний елемент; охолодження; концентрація; напівпровідник; тепла енергія.

## I. ВСТУП

Розробка фотоенергетичних установок, що працюють при високих концентраціях сонячного випромінювання, є одним із напрямків зниження собівартості виробленої ними електричної енергії [1]. У таких установках це досягається зниженням площі напівпровідникових приладових структур, у яких відбувається перетворення сонячної енергії на електричну енергію [2]. Базовим напівпровідниковим матеріалом таких структур традиційно є арсенід галію, що забезпечує найбільшу серед напівпровідникових структур ефективність фотоелектричного перетворення сонячної енергії. Так у [3] було показано, що багатокаскадні сонячні елементи (СЕ) на основі арсеніду галію досягають ефективності 39.2% в умовах освітлення АМ1 і 47.1% при 143 кратній концентрації сонячного випромінювання.

В умовах концентрованого випромінювання необхідне охолодження сонячних елементів, оскільки зі зростанням температури їхня ефективність знижується. Більш того, в умовах сильної концентрації сонячного випромінювання, зростання температури може призвести до руйнування багатокаскадних сонячних елементів. Тому за використання концентрованого сонячного випромінювання стає актуальним забезпечення відведення теплової енергії від сонячного елемента. Швидкість відведення теплової енергії має бути достатньою для обмеження робочої температури сонячного елемента на заданому рівні, який визначається величиною температурного коефіцієнта зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) сонячного елемента. В даний час промислово випускаються фотоелектричні установки, в яких, як система концентрації, використовуються лінзи Френеля [4], що концентрують сонячне випромінювання на сонячні елементи площею (0.5-1) см<sup>2</sup>. У цих установках як теплообмінники для відведення тепла використовують масивні мідні пластини, що забезпечують розсіювання теплової енергії від СЕ в навколишній простір [4, 5]. Така конструкція фотоелектричної установки не передбачає утилізацію теплової енергії. Разом з тим, утилізація теплової енергії дозволить суттєво підвищити конкурентні переваги та знизити терміни окупності фотоенергетичних установок, що працюють в умовах концентрованого сонячного випромінювання.

Останнім часом низка фірм налагодила промислове виготовлення сонячних елементів і модулів на основі арсеніду галію з ККД більше 30%, і, з досить великою площею [6], що принципово дозволяє компактно розміщувати їх на поверхні одного невеликого теплообмінного блоку, в якому відбувається передача теплової енергії від СЕ до теплоносія. У цій роботі

розглянуто енергетичний баланс фотоенергетичної установки, що працює в умовах концентрованого сонячного випромінювання, та на основі аналізу теплових процесів, запропоновано конструкцію теплообмінного блоку з «мікро» каналами.

## II. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ФОТОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

На поверхню тепло-фото-енергетичного блоку від концентратора сонячного випромінювання надходить енергія  $Q$ , яка частково перетворюється на електричну енергію  $Q_E$  за допомогою сонячних елементів, а частково на теплову енергію  $Q_T$ .

$$Q = Q_E + Q_T, \quad (1)$$

$$Q_E = r_z \alpha_1 \eta S_{ph} K Q_s, \quad (2)$$

$$Q_T = [\alpha S_2 + (1 - \eta - r_{ph}) S_{ph}] r_z K Q_s, \quad (3)$$

де  $Q_s$  – потужність сонячної енергії на одиницю поверхні,  $K = S_a/S_p$  – коефіцієнт концентрації,  $S_F$  – площа фокальної плями,  $S_a$  – площа апертури концентратора,  $r_z$  – коефіцієнт відбиття концентратора,  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії СЕ,  $S_{ph}$  – площа СЕ,  $r_{ph}$  – коефіцієнт відбиття від поверхні СЕ,  $\alpha_1$  – коефіцієнт поглинання поверхні СЕ,  $S_2 = S_F - S_{ph}$  – площа поверхні у фокальній плямі, не зайнята СЕ,  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання вільної поверхні

Теплова енергія, що поступила на поверхню теплообмінного блоку, частково буде передана теплоносію  $Q_f$ , а частково буде втрачена, за рахунок теплового випромінювання  $Q_c$  та конвекційного теплообміну з атмосферою  $Q_w$ :

$$Q_T = Q_f + Q_w + Q_c. \quad (4)$$

Оскільки поверхня робочого блоку нічим не покрита, повний теплообмін з атмосферою  $Q_a$ , визначається одним рівнянням:

$$\begin{aligned} Q_a = Q_w + Q_c = & h_w [(T_p - T_a) S_{ph} + [(T_{p1} - T_a) S_2 + (T_f - T_a) (S_l + S_p)]] + \\ & + \sigma_0 [\varepsilon_p (T_p^4 S_{ph} + T_{p1}^4 S_2) + \varepsilon_{pb} (S_f + S_p) T_f^4 - \\ & - (\varepsilon_{pb} (S_p + S_l) + \varepsilon_p (S_{ph} + S_2)) T_s^4], \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\sigma_0 = 5.6697 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – константа Стефана-Больцмана,  $\varepsilon_p$  – ступінь чорноти робочої поверхні теплообмінного блоку,  $\varepsilon_{pb}$  – ступінь чорноти неробо-

чої поверхні теплообмінного блоку,  $h_w = 5.7 + 3.8V$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну поверхні з атмосферою [7],  $V$  – швидкість вітру (м/с),  $T_p$  – температура поверхні теплообмінного блоку,  $T_{p1}$  – температура вільної поверхні теплообмінного блоку,  $T_a$  – температура атмосфери,  $T_f$  – середня температура охолоджувальної рідини,  $T_s$  – температура небосхилу,  $S_l$  – площа бічної поверхні теплообмінного блоку.

Доданки в  $Q_a$ , що включають  $T_f$ , враховують теплообмін задньої сторони теплообмінного блоку з атмосферою. Температуру тильної сторони теплообмінного блоку, внаслідок високої теплопровідності матеріалу корпусу, можна приблизно прийняти рівною температурі охолоджуючої рідини. Доданки з негативним знаком у  $Q_a$  враховують прихід розсіяної компоненти інфрачервоного випромінювання від атмосфери на поверхню теплообмінного блоку.

Формулу для розрахунку теплових втрат можна спростити, якщо прийняти різними лише температури освітленої ( $T_p$ ) та неосвітленої поверхонь ( $T_f$ ). Це призведе до більшого значення втрат, але, як впливає з розрахунків, ці втрати однаково залишаються меншими, ніж 1 – 2 %.

Для оцінки можливих значень теплової енергії, яку необхідно відвести від сонячних елементів, щоб забезпечити їм прийнятну робочу температуру, потрібно задати зовнішні умови, можливі габаритні розміри теплообмінного блоку та параметри системи концентрації.

З міркувань необхідності відведення пікових теплових навантажень вибираємо параметри довкілля характерні для південних широт (табл. 1).

**Таблиця 1.** Атмосферні параметри

Параметр	Значення
Максимальна миттєва потужність сонячного випромінювання $Q_s$ , Вт/м <sup>2</sup>	1000
Температура атмосфери $T_a$ , °C	30
Температура небосхилу, для літнього періоду $T_s$ , K	290
Середня швидкість вітру $V$ , м/с	5

Спираючись на характеристики сонячних елементів на основі арсеніду галію, які виробляються промислово та доступні на ринку, можна задати необхідні геометричні розміри теплообмінного блоку для їхнього розміщення. Ми розглянемо теплообмінний блок для розміщення двох сонячних елементів, що є половинками квадрата зі зрізаними кутами [6]. Форма майданчика для розміщення СЕ буде також близька до квадрата, що найбільш оптимально при використанні концентруючої системи з круглою фокальною плямою. Параметри системи концентрації можна задати виходячи з геометричного коефіцієнта концентрації, який дозволить визначити необхідну площу апертури концентратора (виходячи з необхідного

розміру фокальної плями) і зібрану ним енергію. Далі в таблиці 2 наведено основні геометричні розміри тепло-електро-енергетичного блоку, що визначають значення вироблення теплової та електричної енергії, а також розрахунки досяжних значень вироблення енергії.

**Таблиця 2.** Розрахунок розмірів теплообмінного блоку, концентратора та енергії зібраної концентратором та виробленої електричної та теплової системами

Розміри теплообмінного блоку	
Довжина діагоналі майданчика, зайнятого СЕ, см	10,2
Довжина теплообмінного блоку $H$ , см	9,7
Ширина теплообмінного блоку $W$ , см	9,7
Товщина теплообмінного блоку $L$ , см	1
Площа поверхні теплообмінного блоку $S_p = H \times W$ , см <sup>2</sup>	94,1
Площа бічної поверхні теплообмінного блоку $S_l = 2(H + W)L$ , см <sup>2</sup>	38,8
Довжина охолоджуваної частини поверхні теплообмінного блоку $l$ , см	8,2
Ширина охолоджуваної частини поверхні теплообмінного блоку $h$ , см	8,2
Активна площа СЕ $S_{ph}$ , см <sup>2</sup>	30,15
Площа, необхідна розміщення 2-х СЕ $S$ , см <sup>2</sup>	60,3
Розміри концентратора та зібрана ним енергія	
Геометричний коефіцієнт концентрації $K = 4S_a/\pi d^2$	400
Діаметр фокальної плями $d$ , см	10,5
Площа фокальної плями $S_f = \pi d^2/4$ , см <sup>2</sup>	86,6
Площа апертури концентратора $S_a$ , м <sup>2</sup>	3,46
Діаметр концентратора $D$ , м	2,1
Коефіцієнт відбиття поверхні концентратора $r_z$	0,95
Енергія, зібрана концентратором $Q = r_z S_a Q_s$ , Вт	3290
Розрахунок виробленої електричної енергії	
Коефіцієнт корисної дії СЕ $\eta$ , %	30
Коефіцієнт поглинання СЕ $\alpha_1$	0,95
Очікувана електрична потужність $Q_E$ , Вт	653
Розрахунок отриманої теплової енергії	
Коефіцієнт поглинання вільною освітленою поверхнею теплообмінного блоку $\alpha_2$	0,9
Вільна освітлена площа поверхні теплообмінного блоку $S_2 = S_f - S$ , см <sup>2</sup>	26,3
Теплова енергія, поглинена системою СЕ та вільною освітленою поверхнею тепло-	2389

обмінного блоку $Q_T$ , Вт	
Повна поглинена енергія $Q_{ET} = Q_E + Q_T$ , Вт	3042
Енергія, відбита від поверхні $Q_I = Q - Q_{ET}$ , Вт	248

Таким чином, для концентруючої системи, порівнянної з розміром стандартної сонячної батареї, маємо оцінку можливих значень вироблення електричної  $Q_E = 653$  Вт. При цьому системою СЕ та вільною освітленою поверхнею теплообмінного блоку буде поглинена теплова енергія  $Q_T = 2389$  Вт. Отримане значення  $Q_T$  є основним вихідним даними для розрахунку необхідних характеристик відведення тепла від термо-фото-енергетичного блоку.

### III. АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТЕПЛОБІМІННОМУ БЛОЦІ

Основним елементом фотоенергетичної установки є фотоприймач, що є сонячним модулем, розташований на поверхні теплообмінного блоку. Фотоприймач забезпечує перетворення сонячної енергії в електричну енергію, за допомогою сонячного модуля та теплової енергії, за рахунок теплообміну нагрітих поверхонь з охолоджувальною рідиною. Оскільки велика кількість енергії концентрується на малій площі, для досягнення прийнятних температур СЕ, що входять до складу сонячного модуля, необхідно мати достатньо інтенсивний теплообмін між поверхнею, на яку надходить енергія та рідиною, що охолоджує. Для виконання цієї вимоги є дві можливості, які спрямовані на:

- Збільшення площі теплообміну за рахунок збільшення поверхні радіатора, як правило, цього можна досягти за допомогою пластинчастих радіаторів;
- Створення умов для турбулентного або перехідного режиму потоку охолоджувача.

Як показали розрахунки, значне збільшення поверхні теплообміну потребує використання високих пластин радіатора. При цьому для досягнення необхідної площі теплообміну, в умовах ламінарного потоку, висота ребра повинна бути такою, що перепад температури на ній складатиме більше  $15^\circ\text{C}$ , що суттєво знижує ефективність теплообміну. Крім того, з високими пластинами складно забезпечити рівномірний розподіл рідини, що охолоджує, по всіх каналах радіатора. Тому було обрано конструкцію з меншою ефективною площею теплообміну, але з можливістю збільшення коефіцієнта теплообміну за рахунок створення турбулентного потоку.

Тепловий потік при теплопередачі від поверхні радіатора до рідини можна подати за допомогою закону теплопередачі Ньютона:

$$Q_f = h_f(T_w - T_f)S_r, \quad (6)$$

де  $h_f$  – коефіцієнт теплообміну між теплоносієм та корпусом теплообмінного блоку,  $S_r$  – площа поверхні радіатора,  $T_w$  – середня температура стінки радіатора.

Використовуючи формули (6), (4) та (5) можна визначити необхідне значення коефіцієнта теплопередачі від поверхні радіатора до теплоносія:

$$h_f = (Q_T - Q_a)/(T_w - T_f)/S_r. \quad (7)$$

Ще одна важлива характеристика, що визначає необхідну продуктивність насоса – масова витрата теплоносія  $m$ . Ця величина визначається з умови рівності енергії, що передається теплоносію з теплообмінної поверхні радіатора і накопиченої ним за рахунок теплоємності:

$$Q_f = m' C_{pw}(T_{fo} - T_{fi}) \Rightarrow m' = (Q_T - Q_a)/C_{pw}(T_{fo} - T_{fi}) \quad (8)$$

де  $C_{pw}$  – теплоємність води Дж/(кг К),  $T_{fi}$  і  $T_{fo}$  – температура води на вході та виході в теплообмінний блок, відповідно.

Знаючи масові витрати можна розрахувати швидкість руху потоку

$$w = m'/\rho S_n = (Q_T - Q_a)/C_{pw}(T_{fo} - T_{fi})/\rho S_n, \quad (9)$$

де  $\rho$  – щільність теплоносія (води),  $S_n = nS_1$  – повна площа перерізу для проходу теплоносія,  $S_1$  – площа перерізу одного каналу радіатора,  $n$  – кількість каналів.

Далі можна скористатися критеріальними рівняннями гідродинаміки для розрахунку коефіцієнта теплопередачі від поверхні радіатора до теплоносія. Ці рівняння мають такий вигляд:

$$h_f = \lambda Nu/d_e, \quad (10)$$

де  $d_e = 4S_1/P$  – ефективний діаметр каналу,  $P$  – периметр перетину каналу,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності теплоносія,  $Nu$  – число Нуссельта, яке для перехідного режиму дорівнює [8, 9]:

$$Nu = K_0 \varepsilon_i Pr^{0.43} (Pr_f/Pr_w)^{0.25}, \quad (11)$$

а для турбулентного

$$Nu = 0.021 \varepsilon_i Re^{0.8} Pr^{0.43} (Pr_f/Pr_w)^{0.25}. \quad (12)$$

Тут  $\varepsilon_i$  – коефіцієнт, що залежить від відношення

довжини каналу до ефективного діаметру,  $Re = wd_e/\nu$  – число Рейнольдса,  $w$  – швидкість потоку,  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості, комплекс  $K_0$  залежить від числа Рейнольдса,  $Pr_f$  і  $Pr_w$  – числа Прандтля при температурі рідини та стінки, відповідно.

Узгодження значень  $h_f$ , отриманих за формулами (7) і (10), проводиться шляхом варіювання середньої температури теплоносія та (або) температур теплоносія на вході та виході теплообмінного блоку.

Для збільшення коефіцієнта теплообміну необхідно створити умови для турбулентного або перехідного режиму потоку охолоджувача. Цього можна досягти за рахунок збільшення швидкості потоку рідини в каналах між пластинами радіатора, що можливо за рахунок зменшення ефективного діаметра каналу. Зображення моделі теплообмінного блоку із пластинчастим радіатором представлено на рис. 1.



а)



б)

**Рисунок 1.** Зображення моделі теплообмінного блоку: а) вид знизу; б) вид у середині

Теплообмінний блок має один впускний отвір та випускний колектор, що поєднує два випускні отвори для теплоносія. Розподіл потоку «мікро каналами» радіатора походить з центрального каналу, що дозволяє вдвічі збільшити ефективний переріз для протікання потоку, і істотно знизити гідродинамічний опір, тим самим знижуючи вимоги до потужності насоса для прокачування теплоносія.

У таблиці 3 наведено обрані геометричні параметри теплообмінного блоку, які дозволяють досягти необхідних значень коефіцієнта теплообміну, і наве-

дено розрахунки теплових процесів, які це демонструють. Розрахунки проведені для максимального очікуваного значення коефіцієнта концентрації і для максимального значення надходження теплової енергії, яку необхідно відвести (див. таблицю 2). Крім того, температура теплоносія на вході прийнята такою, щоб забезпечити максимально складні умови для охолодження, які можуть виникнути для замкнутої системи охолодження ближче до завершення денного циклу роботи.

**Таблиця 3.** Розрахунок показників теплообмінного блоку

Параметр	Значення
<b>Основні геометричні характеристики радіатора теплообмінного блоку</b>	
Площа поверхні теплообмінного блоку $S_p$ , $\text{см}^2$	94,1
Вільна освітлена площа поверхні теплообмінного блоку $S_2$ , $\text{см}^2$	26,3
Площа бічної поверхні теплообмінного блоку $S_b$ , $\text{см}^2$	38,8
Довжина охолоджуваної частини поверхні теплообмінного блоку $l$ , $\text{см}$	8,2
Ширина центрального розподільчого каналу радіатора $w_1$ , $\text{мм}$	6
Довжина "мікро каналу" радіатора $l_1 = (h - w_1)/2$ , $\text{см}$	3,8
Ширина "мікро каналу" радіатора $a$ , $\text{мм}$	0,5
Ширина ребра радіатора $w$ , $\text{мм}$	1
Висота ребра радіатора $b$ , $\text{мм}$	1,3
Товщина пластини в області каналу $t$ , $\text{мм}$	0,7
Кількість "мікро каналів радіатора", $N = 2 \cdot l / (a + w)$	110
Площа поверхні радіатора $S_r = N(bw + l_1(a + 2b)) + hw_1$ , $\text{см}^2$	135,93
Коефіцієнт підвищення площі поверхні, з якої знімається тепло $k = S_r/hl$	2,02
Площа перерізу каналу $S_1 = ab$ , $\text{см}^2$	0,0065
Повна площа перетину для потоку води $S_n = NS_1$ , $\text{см}^2$	0,715
Ефективний діаметр $d_e = 4S_1/P$ , $\text{см}$	0,00722
<b>Основні теплові характеристики радіатора теплообмінного блоку</b>	
Коефіцієнт поглинання вільною освітленою поверхнею теплообмінного блоку $\alpha$	0,9
Теплова енергія, поглинена системою СЕ та вільною освітленою поверхнею теплообмінного блоку $Q_T$ , $\text{Вт}$	2389
Робоча температура СЕ $T_p$ , $^\circ\text{C}$	70
Товщина германієвої підкладки СЕ, $\text{мкм}$	200

Коефіцієнт теплопровідності германія, Вт/м	55
Коефіцієнт теплопровідності міді, Вт/м	400
Падіння температури на товщині підкладки та теплопровідної пасти, °С	1,4
Падіння температури на товщині мідного корпусу блоку, °С	0,58
Падіння температури на довжині мідного ребра радіатора, °С	1,1
Падіння температури під поверхнею СЕ до контакту з теплоносієм у середньому можна прийняти, °С	3,1
Температура вільної поверхні теплообмінного блоку буде меншою за температуру поверхні СЕ $T_{p1}$ , °С	68,6
Середня температура стінки радіатора $T_w$ , °С	68,5
Середня температура теплоносія $T_f$ , °С	50
Температуру тильної та бічної поверхні теплообмінного блоку приймаємо рівною середній температурі теплоносія, °С	50
Ступінь чорноти поверхні СЕ $\varepsilon_{ph}$	0,95
Ступінь чорноти поверхні теплообмінного блоку $\varepsilon_p$	0,9
Ступінь чорноти тильної та бічної поверхні теплообмінного блоку приймаємо рівною $\varepsilon_{pb}$	0,8
Коефіцієнт конвекційних втрат $h_w$ , Вт/(К·м <sup>2</sup> )	24,7
Конвекційні втрати $Q_w$ , Вт	15
Втрати на випромінювання $Q_c$ , Вт	5,1
Повні втрати теплової енергії $Q_a$ , Вт	20,1
Теплова енергія, яка має бути передана теплоносію $Q_f$ , Вт	2369
Коефіцієнт теплопередачі від стінки радіатора до рідини, необхідний передачі тепла $Q_f$ теплоносія $h_f$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) (розрахунок за формулою (6))	9420
Температура води на вході в теплообмінник $T_{f1}$ , °С	48,1
Температура води на виході з теплообмінника $T_{f2}$ , °С	51,9
Нагрівання води після проходження через теплообмінник, $\Delta T = T_{f2} - T_{f1}$ , °С	3,8
Теплоємність води $C_{pw}$ при 50 °С, Дж/(кг·К)	4174
Масова витрата $m'$ , кг/с	0,146
Масова витрата $m'$ , л/хв.	8,6
Швидкість потоку $w$ , м/с	2,06
Число Рейнольдса $Re$	2675

Режим перехідний $K_0$	5,75
Число Нуссельта $Nu$	10,65
Коефіцієнт теплопередачі від стінки радіатора до рідини, розрахований з режиму потоку $h_f$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) (формула (10))	9556

В результаті проведених розрахунків для радіатора теплообмінного блоку отримано такі пікові значення: витрата води ~8.6 л/хв., швидкість потоку в проміжках між пластинами становить 2.06 м/с, число Рейнольдса  $Re = 2675$ , що відповідає перехідному режиму протікання потоку. Розрахунок коефіцієнта теплообміну між теплоносієм та верхньою пластиною радіатора дає  $hf = 9556$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Порівнюючи це значення з необхідним, розрахованим за формулою (6) ( $hf = 9420$  Вт/(м<sup>2</sup>К)), можна зробити висновок, що обрана конструкція теплообмінного блоку і обрані її параметри здатні забезпечити режим охолодження при піковому надходженні теплового потоку.

Основні енергетичні характеристики пропонованого термофотоелектричного блоку в умовах 400-кратної концентрації сонячного випромінювання наведені в таблиці 4.

Характеристики теплової частини фотоелектричної установки дозволяють оцінити нагрівання теплоносія за день роботи установки. У режимі коли денний максимум сонячної радіації становить 1000 Вт/м<sup>2</sup>, за день можна підвищити температуру 200 літрів води від початкової температури 42 – 43 °С.

**Таблиця 4.** Енергетичні характеристики фотоелектричної установки

Параметр	Значення
Кількість СЕ / та їх ККД, %	2 / 30
Очікувана максимальна електрична потужність $Q_E$ , Вт	653
Очікувана максимальна теплова потужність $Q_T$ , Вт	2369
Повна максимальна корисна потужність $Q = Q_E + Q_T$ , Вт	3022
Повний ККД $\eta = Q/(Q_s S_a)$ , %	87
Відсоток електричної енергії	21,6
Відсоток теплової енергії	78,4

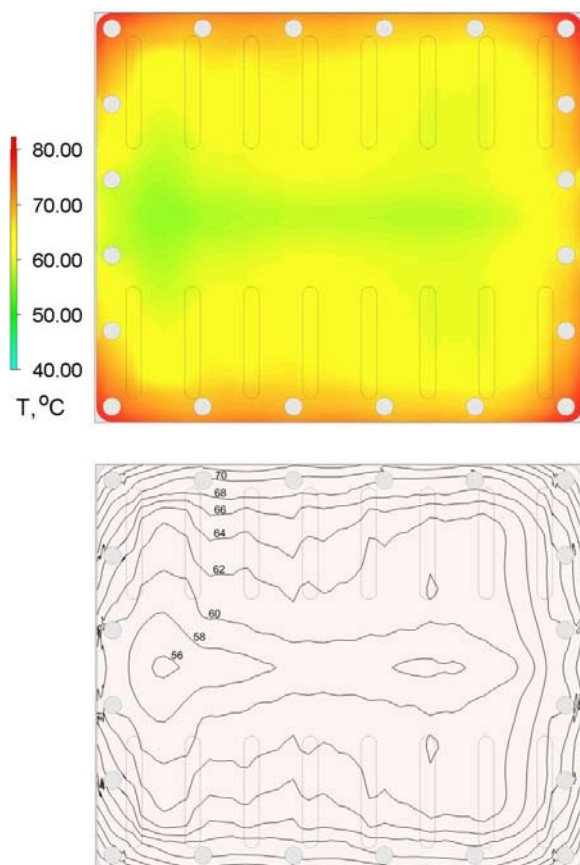
Для визначення рівномірності охолодження поверхні теплообмінного блоку та дослідження можливої варіації швидкості та температури потоку охолоджуваної рідини було проведено комп'ютерне моделювання. Результати модельних розрахунків наведено у таблиці 5. На рис. 2 представлена типова картина очікуваного розподілу температури поверхнею СЕ. Вхідними даними для моделювання були: очікувана максимальна теплова потужність  $Q_T$ , температура води на вході в теплообмінник  $T_{f1}$  та масова витрата  $m'$  (таб. 3).

Як показали результати моделювання (рис. 2),

розподіл температури площі теплообмінного блоку досить рівномірно, найбільш ефективно охолоджуються області вхідного розподільного каналу і вихідного колектора. При цьому між областю розподільчого каналу та краями майданчика, зайнятого СЕ, спостерігається перепад температури  $\sim 12\text{ }^\circ\text{C}$  (така різниця температур може дати різницю струму короткого замикання близько 9%), який збільшується при зменшенні швидкості потоку.

**Таблиця 5.** Результати модельних розрахунків температури поверхні СЕ

Витрата, л/хв (кг/с)	Температура води, $^\circ\text{C}$		Температура поверхні СЕ, $^\circ\text{C}$		
	вхід	вихід	область каналу	основна частина	край
8,6 (0,146)	20	23,62	28-32	37	42
	48	51,62	50-60	60-66	71
7,5 (0,125)	48	52,27	$\sim 52$	62	75
5,0 (0,083)	20	26,89	$\sim 37$	48	52
	48	54,45	$\sim 65$	72	80



**Рисунок 2.** Результати моделювання розподілу температури за площею теплообмінного блоку при масовій витраті 0.146 кг/с (8.6 л/хв.) та температурі теплоносія на вході  $48\text{ }^\circ\text{C}$

Крім того, при зменшенні швидкості потоку збільшується і температура на краях теплообмінного блоку. З іншого боку, в ранкові години на початку роботи системи при низьких температурах рідини, що охолоджує, і меншій миттєвій потужності сонячного випромінювання, можна використовувати менші швидкості потоків для економії енергії на роботу насоса. Моделювання також показує, що для зменшення перепаду температури за площею СЕ конструкцію теплообмінного блоку можна оптимізувати шляхом перенесення входу теплоносія в центр і створенням двох виходів на протилежних краях блоку. В цьому випадку можна поліпшити ефективність охолодження і зменшити перепад температури між областю каналу, що подає, і рештою поверхнею СЕ приблизно в два рази.

#### IV. ВИСНОВКИ

Запропонована конструкція радіатора теплообмінного блоку забезпечує перехідний режим потоку охолоджувальної рідини з коефіцієнтом теплообміну між теплоносієм та верхньою пластиною радіатора.  $hf \sim 10000\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$  при швидкості потоку у проміжках між пластинами  $\sim 2.1\text{ м/с}$ . Це дозволяє ефективно охолоджувати сонячні елементи за умов концентрованого сонячного випромінювання. В умовах освітлення АМ1 та при 400 кратній концентрації сонячного випромінювання навіть при температурі охолоджувальної рідини на вході  $48\text{ }^\circ\text{C}$ , температура арсенідгалієвих СЕ залишається прийнятною для їх ефективної роботи при витраті теплоносія 8.6 л/хв. Моделювання показало, що модернізація конструкції теплообмінного блоку шляхом перенесення входу теплоносія в центр і створення двох виходів на протилежних краях блоку дозволить додатково поліпшити рівномірність охолодження поверхні СЕ.

Проведено оцінку очікуваних встановлених енергетичних характеристик тепло-електро-енергетичної установки, які в умовах АМ1 та 400 кратної концентрації сонячного випромінювання для СЕ з ККД 30% мають такі значення: електрична потужність 650 Вт, теплова потужність, 2370 Вт, повна встановлена корисна потужність 3020 Вт, загальний ККД 87%.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Rodziewicz T., Zaremba A., Wacławek M. Photovoltaics: Solar energy resources and the possibility of their use. *Ecol. Chem. Eng. S.*, 2016, vol. 23, no. 1, p. 9-32. DOI: 10.1515/eces-2016-0001
- [2] He, Y.-L., Qiu, Y., Wang, K., Yuan, F., Wang, W.-Q., Li, M.-J., & Guo, J.-Q. Perspective of concentrating solar power. *Energy*, 2020, vol. 198, art. 117373. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117373
- [3] Geisz J.F., France R.M., Schulte K.L., et al. Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 suns concentration. *Nature Energy*, 2020, no. 5, p. 326-335. DOI: 10.1038/s41560-020-0598-5

- [4] Vignesh N., Arunachala U.C., Varun K. Innovative conceptual approach in concentrated solar PV/thermal system using Fresnel lens as the concentrator. *Energy Sources, Part A*, 2023, vol. 45, no. 4, p. 10122-10143. DOI: 10.1080/15567036.2023.2242800
- [5] Herrando M., Wang K., Huang G., et. al. A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors and systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2023, vol. 97, art. 101072. DOI: 10.1016/j.pecs.2023.101072
- [6] Papež N., Dallaev R., Țălu Ș., Kaštyl J. Overview of the Current State of Gallium Arsenide-Based Solar Cells. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 11, art. 3075. DOI: 10.3390/ma14113075
- [7] Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons Inc., 2023, 910 p. DOI:10.1002/9781118671603
- [8] Xu B., Xu J., Chen Z. Heat transfer study in solar collector with energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 156, no. 6, art. 119778. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119778
- [9] Duta B.K. *Heat Transfer: Principles and Applications*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2023, 648 p.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2024

## THERMAL PROCESSES IN THE HEAT EXCHANGE UNIT OF A COMBINED PHOTOVOLTAIC PLANT WITH SOLAR RADIATION CONCENTRATION

- KHRYPUNOV G.S.** Dr.Sc., Prof., Professor of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: khrip@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6448-5938;
- NIKITIN V.O.** Researcher of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: bicmop@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2644-8340;
- MERIUTS A.V.** PhD, Associate Professor, Associate Professor of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: meriuts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4176-2530;
- MINAKOVA K.O.** PhD, Associate Professor, Leading researcher of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8869-1082;
- ZAITSEV R.V.** Dr.Sc., Prof., Head of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: roman.zaitsev@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2286-8452;
- KIRICHENKO M.V.** PhD, Senior Researcher, Associate Professor of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: mykhailo.kirichenko@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4847-506X;
- SHELEST T.M.** PhD, Associate Professor, Associate Professor of Physics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: tetiana.shelest@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8116-6189;
- LELIUK S.YU.** PhD student of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: stanislav.leliuk@infiz.khpi.edu.ua, ORCID: 0009-0007-4897-1585;

**Purpose.** Calculate the energy balance of a photo-energy installation for operation in conditions of concentrated solar radiation, develop the design of a heat exchange unit with "micro" channels.

**Methodology.** Analytical studies using criterion equations of hydrodynamics, creation and study of computer models based on heat balance equations.

**Findings.** Based on the analysis of thermal processes, the design of a heat exchange unit equipped with "micro channels" for a combined photoelectric plant designed to work in conditions of concentrated solar radiation is proposed. It is shown that such a design creates a transitional mode of cooling liquid flow, which allows for efficient cooling of solar cells under conditions of concentrated solar radiation. Based on the results of research, ways of improving the design of the heat exchange unit for equipping a photoelectric system designed to work in conditions of disruption of the typical energy infrastructure are proposed. It has been shown that in order to reduce the temperature difference



over the SC area, the design of the heat exchange block can be optimized by moving the coolant inlet to the center and creating two exits at the opposite ends of the block.

**Originality.** For the first time, the design of the radiator of the heat exchange unit based on "micro-channels" was proposed, which provides a transitional mode of coolant flow with a heat exchange coefficient between the coolant and the upper plate of the radiator.  $hf \sim 10000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  at a flow speed in the gaps between the plates  $\sim 2.1 \text{ m/s}$ .

**Practical value.** The evaluation of the efficiency, thermal and electrical characteristics of the combined photo-energy system with the concentration of solar radiation was performed. It is proposed to use the developed design of the heat exchange unit for equipping a photoelectric plant for operation in conditions of disruption of the typical energy infrastructure. A preliminary calculation of the thermal and electrical parameters of a photovoltaic installation equipped with multi-cascade solar cells based on gallium arsenide and a heat exchange unit with "microchannels" was carried out.

**Keywords:** solar cells; cooling; concentration; semiconductor; thermal energy.

#### REFERENCES

- [1] Rodziewicz T., Zaremba A., Waclawek M. (2016). Photovoltaics: Solar energy resources and the possibility of their use. *Ecol. Chem. Eng. S.*, 23, 1, 9-32. DOI: 10.1515/eces-2016-0001
- [2] He, Y.-L., Qiu, Y., Wang, K., Yuan, F., Wang, W.-Q., Li, M.-J., & Guo, J.-Q. (2020). Perspective of concentrating solar power. *Energy*, 198, 117373. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117373
- [3] Geisz J.F., France R.M., Schulte K.L., et. al. (2020). Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 suns concentration. *Nature Energy*, 5, 326-335. DOI: 10.1038/s41560-020-0598-5
- [4] Vignesh N., Arunachala U.C., Varun K. (2023). Innovative conceptual approach in concentrated solar PV/thermal system using Fresnel lens as the concentrator. *Energy Sources, Part A*, 45, 4, 10122-10143. DOI: 10.1080/15567036.2023.2242800
- [5] Herrando M., Wang K., Huang G., et. al. (2023). A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors and systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 97, 101072. DOI: 10.1016/j.pecs.2023.101072
- [6] Papež N., Dallaev R., Țălu Ș., Kaštyl J. (2021). Overview of the Current State of Gallium Arsenide-Based Solar Cells. *Materials*, 14, 11, 3075. DOI: 10.3390/ma14113075
- [7] Duffie J.A., Beckman W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons Inc., 910. DOI:10.1002/9781118671603
- [8] Xu B., Xu J., Chen Z. (2020). Heat transfer study in solar collector with energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156, 6, 119778. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119778
- [9] Duta B.K. (2023). *Heat Transfer: Principles and Applications*. PHI Learning Pvt. Ltd., 648.

УДК 621.316.11

## АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЩО МІСТЯТЬ ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

ЗАБОЛОТНИЙ  
А.П.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: zap@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8696-661X;

ФЕДОША Д.В.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: fdv@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0683-0561;

ДЬЯЧЕНКО В.В.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: dvv.epp@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8705-9683.

**Мета роботи.** *Формування оптимальних схемотехнічних рішень локальних електроенергетичних систем що містять відновлювані джерела електроенергії з точки зору мінімуму втрат електричної енергії та зниження річних приведених витрат.*

**Методи дослідження.** *Математичне моделювання локальних електроенергетичних систем що містять відновлювані джерела електроенергії. Методи декомпозиції та редукції схем систем електропостачання, що оптимізуються. Метод потенційних поверхонь. Методи параметричної оптимізації отриманих схемотехнічних рішень.*

**Отримані результати.** *Зазначено, що хоча частка відновлюваних джерел електричної енергії продовжує зростати і стрімко розвивається, однак галузь все ще стикається з багатьма проблемами, зокрема, як продовжувати знижувати втрати електричної енергії та річні приведені витрати, покращити ефективність експлуатації та обслуговування, підтримувати стабільність електромережі, забезпечити безпеку та надійність роботи системи електропостачання що містять відновлювані джерела електричної енергії.*

*Показано, що ефективне рішення зазначених проблем можливе лише на основі аналізу перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем, які містять відновлювані джерела електричної енергії, розробки механізмів технічного та організаційного забезпечення, які сприятимуть побудові сучасних системних (схемотехнічних) рішень.*

**Наукова новизна.** *Запропоновано застосувати метод потенційної поверхні для побудови оптимальної структури локальної електроенергетичної системи при її проектуванні та модернізації в умовах присутності в ній відновлюваних джерел електричної енергії, який дозволяє оптимізувати структуру мережі з точки зору втрат електричної енергії та зниження річних приведених витрат.*

**Практична цінність.** *Описано алгоритм формування структури систем електропостачання, що реалізує одночасне вирішення завдань визначення кількості вузлів навантаження, розподілу електроприймачів між ними, визначення конструкції джерел живлення з урахуванням дискретності дизайн елементів системи.*

*Запропонована формалізована методика побудови оптимальних схемотехнічних рішень локальної електромережі з відновлюваними джерелами живлення при її проектуванні та модернізації, що дозволяє оптимізувати структуру електромережі з мінімальними втратами електроенергії та зменшити дисконтовані витрати.*

*Крім того, на основі спільного використання оціночних та оптимізаційних моделей запропонований метод дозволяє оптимізувати навантаження кабельних ліній що призводить до зменшення втрат в них.*

*Наведено результати чисельного моделювання на основі запропонованого алгоритму на прикладі розв'язання задачі реконструкції ділянки міської магістралі після підключення до неї відновлюваних джерел живлення.*

**Ключові слова:** *відновлювані джерела енергії; метод потенційних поверхонь; структура систем електропостачання; вузол навантаження; електроприймач; втрати електричної енергії.*

### I. ВСТУП

У сучасних умовах повномасштабної війни та зростання цін на первинні енергоносії всі галузі промислового виробництва України гостро

потребують розосереджених та надійних джерел електричної енергії. Особливу потребу в них відчуватимуть у післявоєнні роки промислові комплекси, на яких буде покладено завдання якнайшвидшого відновлення економіки країни.

Загальновідомо, що системи електропостачання промислових підприємств нерозривно пов'язані з міськими мережами електропостачання, які покликані забезпечувати електроенергією інфраструктурні об'єкти, що обслуговують і забезпечують стабільну роботу цих промислових комплексів.

Міські електричні мережі, як відомо, відрізняються великою протяжністю, розгалуженістю при порівняно малій потужності, що передається, а також використанням низьких класів напруги.

Тенденції зростання тарифів на електричну енергію обумовлюють значне збільшення складової вартості втрат електричної енергії (ВЕЕ) в таких мережах при її передачі та розподілі й як наслідок - збільшення річних приведених витрат.

Ще в довоєнний період спостерігалось постійне зростання частки «малої» генерації в енергобалансі як промислових підприємств так і міських системах електропостачання. Це пов'язано з впровадженням відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) як засобу забезпечити безпеку та надійність роботи системи електропостачання та підтримувати стабільність електромережі в цілому. Найбільш широке впровадження отримали сонячні та вітроелектростанції, когенераційні енергоустановки на біопаливі тощо.

Хоча частка відновлюваних джерел електричної енергії продовжує зростати і стрімко розвивається, однак галузь все ще стикається з багатьма проблемами, зокрема, як продовжувати знижувати ВЕЕ та річні приведені витрати, покращити ефективність експлуатації та обслуговування, підтримувати стабільність електромережі, забезпечити безпеку та надійність роботи системи електропостачання що містять ВДЕ.

Ефективне рішення зазначених проблем можливе лише на основі аналізу перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем (ЛЕС), які містять ВДЕ, розробки механізмів технічного та організаційного забезпечення, які сприятимуть побудові сучасних системних (схемотехнічних) рішень [1].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останнім часом, все більш широко стали вводитися в експлуатацію об'єкти з комплексним використанням декількох ВДЕ, які виробляють вже промислові обсяги електроенергії як для власних цілей з можливістю мережевого підключення, так і для продажу електроенергії в мережу або іншим споживачам [2].

На жаль, на сьогоднішній день при використанні електроустановок на основі альтернативних джерел енергії стикаються із низкою проблем системного характеру. Так, якщо питання оцінки потенціалу сонячної та вітрової енергії досить докладно вирішені, то при підключенні ВДЕ до існуючої мережі виникає задача пошуку місця її підключення.

Найчастіше підключення таких джерел генерації до ЛЕС неузгоджене, що призводить до складності керування та прогнозування режимів роботи мереж, зростання складової ВЕЕ, оскільки структура їх перестає бути оптимальною з точки зору мінімуму приведених витрат [3] - [4].

Крім того, збільшення частки ВДЕ в загальному обсязі генерованої електроенергії створює ряд загальносистемних технічних проблем [5] - [7]:

- ускладнення диспетчерського управління електроенергетичною системою;

- кожне ВДЕ має свої динамічні характеристики і можливості управління, що тягне необхідність вирішення проблем електромагнітної сумісності;

- ускладнення системи релейного захисту та автоматики, а також протиаварійного управління;

- збільшення струмів короткого замикання, що призводить до заміни комутаційних апаратів, зміни налаштувань захистів та ін.

Але основна проблема неузгодженого приєднання розрізаних ВДЕ до мережі - це складність керування та прогнозування режимів роботи енергосистеми, пов'язані з перетіканням потужностей у мережі та як наслідок - збільшення втрат електричної енергії [8].

Ключовою проблемою при формуванні оптимальної структури ЛЕС є задача визначення кількості джерел живлення і розподіл за ними приймачів електроенергії, а також обладнання проміжних вузлів навантаження (рівнів розподільчої мережі) з урахуванням розрізаних ВДЕ.

Основні підходи при вирішенні задачі побудови оптимальної структури мережі електропостачання базуються на використанні оціночних та оптимізаційних моделей [9]. Перші служать для визначення техніко-економічних показників для заданого проектувальником варіанту мережі. Другі - для визначення оптимального варіанту конфігурації мережі в межах прийнятих проектувальником припущень відповідно до прийнятого критерієм оптимальності. При цьому в оптимізаційних моделях необхідно враховувати дискретність деяких величин (переріз проводів та кабелів, потужність і кількість трансформаторів, кількість приєднань до ВДЕ та ін.).

Визначальним чинником формування схеми електричної мережі є місце розташування джерела живлення та траси прокладання її ділянок, які отримані в результаті оптимізації топологічної задачі з урахуванням метричних обмежень, зумовлених розташуванням природних та технологічних об'єктів [10].

Щодо установки ВДЕ, то їх потужність обумовлена потенціалом первинної енергії, соціально-екологічними обмеженнями, а також технічними факторами (встановленою потужністю, коефіцієнтом корисної дії, напругою генерації та ін.) [11]. Останні тісно пов'язані з конструктивними та техніко-

економічними показниками мережі.

Існуючі підходи до оцінки ефекту від запровадження ВДЕ засновані на обчисленні наступних техніко-економічних показників [12] - [14]:

- початкові капітальні вкладення для будівництва енергетичного об'єкта;
- вартість землі, що відведена під об'єкт;
- вартість заходів на охорону навколишнього середовища;
- витрати на демонтаж об'єктів при виведенні основних фондів або реконструкції;
- поточні витрати на обслуговування та ремонт;
- амортизаційні відрахування на реновацію основних фондів об'єкта, які є витратною частиною проекту.

Очевидний взаємозв'язок між техніко-економічними показниками ЛЕС та ВДЕ вимагає розробки нової моделі електричної мережі, яка буде покладена у методологічну основу її оптимізації з урахуванням застосування всього ряду техніко-економічних показників альтернативних джерел електроенергії [15].

Аналіз існуючих підходів до формування структури систем електропостачання показав, що існує метод, здатний вирішувати вище перераховані задачі одночасного - це метод потенційних поверхонь [9].

### III. МЕТА РОБОТИ

Пропонується застосувати метод потенційних поверхонь з метою формування оптимальних схемотехнічних рішень локальних електроенергетичних систем що містять відновлювані джерела електроенергії з точки зору мінімуму втрат електричної енергії та зниження річних приведених витрат.

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

Суть методу потенційних поверхонь полягає в проведенні аналогії між навантаженням приймачів ( $P_i$ ), розташованих в точках  $(x_i, y_i)$ , і потенціалами деяких джерел енергії, розташованих у тих же точках. Потенціали цих джерел дорівнюють навантаженням приймачів. При віддаленні від точки розташування приймача потенціал від джерела, розташованого в тій самій точці, зменшуватиметься і в деяких віддалених точках потенціал буде близький до нуля. Сукупність усіх потенціалів джерел енергії утворює потенційну поверхню, яку можна описати потенційною функцією

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{-1 \cdot \alpha_{\Delta P_i} [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]}$$

де:  $\alpha_{\Delta P_i}$  - коефіцієнт, який враховує втрати потужності від джерела живлення до приймача:

$$\alpha_{\Delta P_i} = \frac{P_i^2 \cdot \rho}{U^2 \cdot F(P_i)}$$

де:  $P_i$  - потужність приймача;  $\rho$  - питомий опір матеріалу провідника;  $U_i$  - напруга;  $F(P_i)$  - переріз провідника визначається як функція від переданої потужності.

Використання запропонованого коефіцієнта  $\alpha_{\Delta P_i}$  дає можливість відразу оцінити ступінь майбутніх ВЕЕ в провідниковому матеріалі під час визначення центру електричних навантажень [9].

Потенційною функцією є основою для "потенційного" критерію відбору, за яким на потенційній поверхні, яку утворює функція, визначається точка максимуму потенціалу. Ця точка надалі виступає в ролі центру електричних навантажень. Приймачі, які будуть отримувати живлення від цього центру електричних навантажень за "потенційним" критерієм визначаються як приймачі, які брали участь у формуванні максимуму потенційної функції. Ці приймачі зараховуються до "потенційної" групи.

Аналогічну поверхню можна побудувати і для ВДЕ, де  $P_i$  приймає значення рівне величині енергії, що генерується таким джерелом енергії, але зі знаком мінус.

Накладення цих двох поверхонь призводить до зміни координат максимуму, тим самим уточнюються координати встановлення джерела живлення.

Важливим моментом у визначенні цих координат є урахування зон неприпустимості прокладання ліній та встановлення джерел живлення.

«Потенційна група» є закінченим структурним елементом майбутньої розподільчої мережі, але той факт, що при формуванні "потенційної" групи були враховані лише розташування приймачів відносно один одного і очікувані ВЕЕ в розподільчій мережі, не дає можливості запровадити "потенційну" групу в майбутню розподільчу мережу, так як крім врахованих факторів ще необхідно провести узгодження майбутньої "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням вузла мережі.

Для вирішення цієї задачі використовується "технічний" критерій. "Технічний" критерій відбору виконує функцію узгодження приймачів "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням її джерела живлення. Критерій діє на основі принципу надлишковості "потенційної" групи по відношенню до граничних умов "технічного" критерію. На основі взаємодії "потенційного" і "технічного" критеріїв відбору складається алгоритм методу, принцип роботи якого базується на утворенні зворотних зв'язків, які охоплюють обидва критерії і створюють умови для становлення алгоритму як самоорганізуючої моделі побудови структури мережі [15].

Таким чином, побудову структури ЛЕС, що містить ВДЕ, можна представити у вигляді наступного алгоритму.

На першому етапі будується потенційна поверхня для електроприймачів в режимі споживання.

На другому етапі будується поверхня для режиму,

в яких ВДЕ виробляють електроенергію в мережу.

Потім проводиться накладення цих поверхонь і на сумарній поверхні виділяється максимум функції, в координатах якого і буде розташоване джерело живлення. Важливим моментом у визначенні цих координат є облік зон неприпустимості прокладки ліній і встановлення джерел живлення.

На наступному етапі проводиться відбір електроприймачів за «потенційним» критерієм, а потім за «технічним» з урахуванням дискретності конструктивного виконання елементів.

Згідно з "потенційним" критерієм відбору на потенційній поверхні, визначається точка максимуму потенціалу. Ця точка надалі виступає в ролі центру електричних навантажень. Приймачі, які будуть отримувати живлення від цього центру електричних навантажень зараховують до "потенційної" групи.

«Технічний» критерій відбору виконує функцію узгодження приймачів "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням її вузла живлення.

В результаті відбору електроприймачів за вищевказаними критеріями формується група електроприймачів першого джерела живлення, що виключається з подальшого розгляду при формуванні структури ЛЕС.

Після цього, знову будуються дві (якщо залишилися ВДЕ), або одна (якщо всі ВДЕ приєднані

до джерел живлення) потенційні поверхні і здійснюється формування групи електроприймачів другого джерела живлення.

У результаті циклічної дії (до того, поки всі електроприймачі не отримають своє джерело живлення) формується радіальна структура системи електропостачання, після чого здійснюється перевірка можливості організації проміжних джерел живлення [15], для чого «потенційний» та «технічний» критерій відбору згруповані у окрему функцію «ФормуванняСтруктуриМережі», рекурсивний виклик якої для вже сформованого вузла дозволяє виконати спробу сформувати проміжні вузли навантаження.

На останньому етапі проводиться оцінка можливості (за критеріями мінімуму капітальних витрат і ВЕЕ) заміни окремих ділянок радіальної мережі на магістральні ділянки.

Даний підхід дозволяє не тільки автоматизувати побудову оптимальної структури розподільної мережі, що містить джерела «малої генерації», а й знизити розміри капітальних вкладень при побудові такої мережі за рахунок застосування проміжних вузлів навантаження (визначення їх оптимальної кількості та розташування). Блок схема алгоритму побудови структури ЛЕС що містять ВДЕ подано на рис. 1.

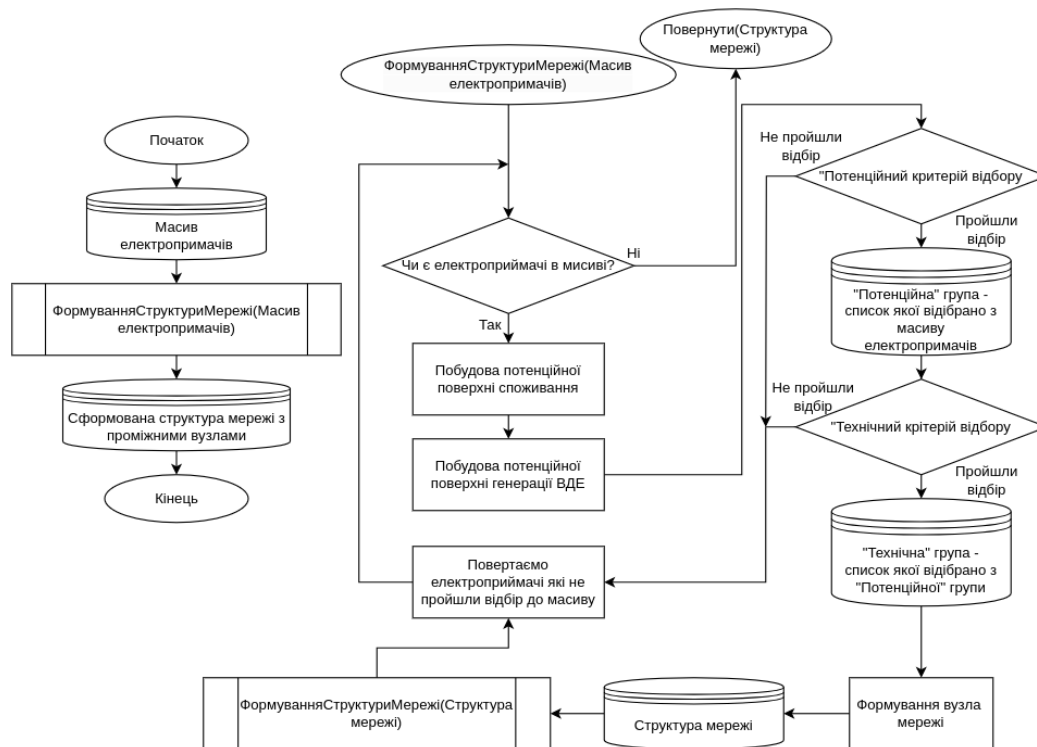


Рисунок 1. Блок схема алгоритму побудови структури ЛЕС що містять ВДЕ.

Запропонований алгоритм був реалізований програмно за допомогою мови програмування Python і пакета математичного обчислення SciPy.

Використання даного алгоритму дозволяє побудувати інженерні методики для попереднього розрахунку структури ЛЕС що містять ВДЕ, оцінити потенціал вже існуючих розподільних мереж, проводити оцінку ефективності їх роботи при модернізації, а також провести оцінку капіталовкладень при реконструкції частини мережі [16].

#### Результати чисельного моделювання.

Запропонований алгоритм було апробовано на прикладі вирішення задачі реконструкції ділянки міської електричної мережі площею 17 км<sup>2</sup> з розрахунковим навантаженням на повну потужність 31 МВА

Міський район розподілене на 3 мікрорайони, розділених вулицями і проспектами (мікрорайон 1, 2 та 3).

Розрахункові дані навантажень мікрорайонів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Розрахункові дані навантажень мікрорайонів

Навантаження	Мікрорайон		
	МкР 1	МкР 2	МкР 3
ΣP, кВт	9 437	8 040	9 835
ΣS, кВА	10 070	9 007	11 030

Крім цього к ЛЕС міського району підключена кондитерська фабрика з розрахунковим навантаженням  $P=2684,9\text{кВт}$ ,  $S=3903,7\text{кВА}$ .

Оскільки в проектованому районі присутні електроспоживачі I категорії, причому вони рівномірно розподілені по всьому району, то для дотримання умов їх безперебійного електропостачання приймаємо такі схеми живлення

Застосовуємо схему «одна секціонована система шин» з автоматикою АВР на секційному вимикачі для джерела живлення РП2-10 кВ мікрорайону, які підключено до ПС 35/10, та також живить РП1 кондитерської фабрики та інші промислово-міські електроспоживачі.

Живлення ТП здійснюється від двох кабелів, кожен з яких повинен витримувати навантаження в післяаварійному режимі.

Кількість силових трансформаторів – 2 шт. Потужність яких обирається з врахуванням можливості роботи в післяаварійному режимі будь-якого з трансформаторів.

Сумарну потужність всіх ТП мікрорайону розраховуємо з урахуванням коефіцієнта запасу трансформаторів, який приймаємо рівним  $K_3 = 0,77$ .

Розміщення підстанцій на території мікрорайону здійснюється якомога ближче до центрів навантаження (центром навантаження будівлі вважаємо геометричний центр його площі).

Розставляємо підстанції і визначаємо їх координати по системі координат, попередньо нанесену на генплан міського району.

Згідно висунутим раніше вимогам по надійності електропостачання підстанції виконуємо двохтрансформаторними.

Потужність та кількість ТП мікрорайону:

МкР 1: 2 x 1 000 кВА - 6 шт., 2 x 630 кВА - 3 шт.

МкР2: 2 x 1 000 кВА - 4 шт., 2 x 630 кВА - 4 шт.

МкР3: 2 x 1 000 кВА - 7 шт., 2 x 630 кВА - 1 шт.

Джерелом живлення є двохтрансформаторна підстанція із трансформаторами 2xТМН – 25000/35. Електричні мережі напругою 35 кВ конструктивне реалізовані повітряними лініями, прокладеними на залізобетонних опорах.

Електричні мережі напругою 10 кВ конструктивне реалізовані кабельними лініями, прокладеними в траншеях.

План електричних мереж напругою 35 кВ (живильна ділянка) та 10 кВ (розподільна ділянка) представлений на рис. 2.

Для реалізації енергозберігаючих заходів під час модернізації ЛЕС міського району було запропоновано встановити сонячні електростанції (СЕС) на дахах комунальних підприємств. Зокрема, на дахах лікарні (1 шт.), поліклінік (2 шт.), шкіл (6 шт.) та дитячих садків (6 шт.) у кожному із трьох мікрорайонів.

Розподіл споживачів по мікрорайонах наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Розподіл споживачів по мікрорайонах

Громадські будівлі	Кількість об'єктів		
	МкР 1	МкР 2	МкР 3
Школа	2	1	3
Дитячий сад	2	3	1
Поліклініка	-	-	2
Лікарня	-	1	-

Крім того, на території кондитерської фабрики передбачається встановити когенераційну установку потужністю 300 кВт.

Використання запропонованого алгоритму дозволяє побудувати попередній розрахунок структури ЛЕС що містять ВДЕ, оцінити потенціал вже існуючих розподільних мереж, проводити оцінку ефективності їх роботи при модернізації.

У процесі дослідження було розглянуто такі варіанти електричної мережі:

**перший (I)** – існуюча система електропостачання міського району із зазначеними вище параметрами;

**другий (II)** – електрична мережа, яка отримана на основі оптимізації з урахуванням підключення ВДЕ.

Враховано, що будинки комунальних

підприємств на дахах яких будуть встановлені СЕС та підключені кожен до своєї ТП. розподілені нерівномірно на територіях мікрорайонів

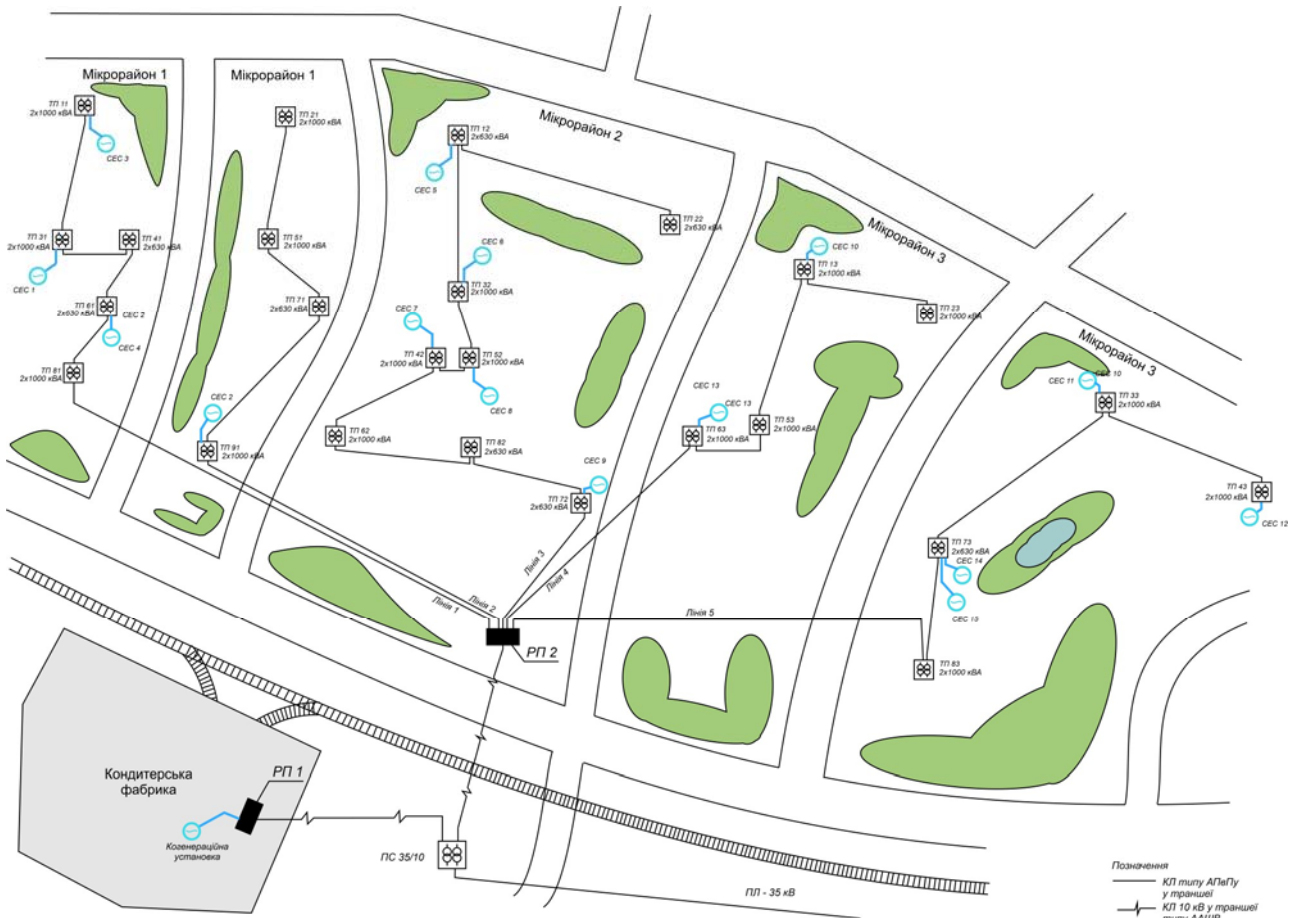


Рисунок 2. План електричних мереж міського району.

Електричне навантаження трансформаторних підстанцій до яких підключені СЕС наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Електричне навантаження ТП та потужності СЕС

№ ТП	№ СЕС	I варіант		II варіант	
		$S_{ТП}$ , кВА	$P_{СЕС}$ , кВт	$S_{ТП}$ , кВА	
11	3	1538	275	1287,8	
61	4	773	275	528	
31	1	1358	165	1207	
91	2	1107	165	956	
32	6	1450	275	1200	
52	8	1437	275	1187	
72	9	926	275	678	
42	7	1174	165	1023	
12	5	920	275	673	
33	11	1437	275	1187	
13	10	1327	165	1176	
43	12	11367	165	1216	
63	13	1371	250	1143	
73	14,15	922	415	559	

Результати чисельного моделювання показують, що використання СЕС (15 шт.) загальною потужністю

3415 кВт дозволило знизити коефіцієнти завантаження трансформаторів тих ТП, до яких вони підключаються, що призвело до зниження ВЕЕ на 10,5%.

Втрати електричної енергії у трансформаторах ТП наведено в табл. 4.

Таблиця 4 Втрати електричної енергії у трансформаторах ТП

№ ТП	$S_{ном}$ , кВА	I варіант		II варіант	
		$Kз$ , в.од.	$W_{ТП}$ , МВт·год	$Kз$ , в.од.	$W_{ТП}$ , МВт·год
11	100	0,77	47,8	0,63	43,4
61	630	0,61	29,5	0,40	26,0
31	1000	0,68	44,6	0,60	42,2
91	1000	0,55	40,8	0,47	38,9
32	1000	0,73	46,2	0,59	33,3
52	1000	0,72	45,9	0,58	42,1
72	630	0,73	32,3	0,52	31,6
42	1000	0,59	41,7	0,50	38,3
12	630	0,73	32,2	0,51	29,4
33	1000	0,72	45,9	0,58	38,2
13	1000	0,66	44,1	0,58	33,3

43	1000	0,68	44,7	0,60	41,9
63	1000	0,69	44,8	0,56	41,8
73	630	0,73	32,5	0,40	32,3
Разом		-	573,0	-	512,8

Крім того, ВЕЕ знижуються також і у розподільчих електричних мережах 0,4 кВ та 10 кВ на 10,1% та 7,3% відповідно. А в мережі живлення 10кВ - до 9%.

## V. ВИСНОВКИ

Запропонований на основі спільного використання оціночних та оптимізаційних моделей формалізований метод побудови структури ЛЕС, що містять ВДЕ, дозволяє врахувати зміну режиму роботи таких мереж та оптимізувати їхню структуру з погляду зниження ВЕЕ в мережах при її передачі та розподілі й як наслідок - зменшення річних приведених витрат.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Денисюк С.П., Белоха Г.С., Чернешук І.С., Лисий В.В. Світові тенденції впровадження відновлюваних джерел енергії та особливості їх реалізації при відновленні економіки України // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. – № 4. – С.7–28.
- [2] Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах электроснабжения. К.: Освіта України, 2007. – 464 с.
- [3] Kjaer S.B., Pedersen J.K., Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. IEEE Trans. Ind. Appl. 41(5), 1292–1306 (2005).
- [4] Meneses D., Blaabjerg F., García O., Cobos J.A. Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application. IEEE Trans. Power Electron. 28(6), 2649–2663(2013).
- [5] Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. Embedded Generation. London; IEE, 2000, 273 p.
- [6] Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 2000, p. 222 - 233.
- [7] Papathanassiou S.A., Hatzigiorgyriou N.D. Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15 - 19, 2001, p. 134 - 138.
- [8] Денисюк С.П., Махлін П.В., Шрам О.А., Слинко В.М. Особливості аналізу режимів роботи енергосистеми у районах з альтернативними джерелами електроенергії (вітровими електростанціями) // Техн. електродинаміка. – 2022. – № 1. – С. 41–49.
- [9] Федоша Д.В., Заболотный А.П. «Синтез энергоэффективных структур систем цехового электроснабжения радиальной топологии» - Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. - 126с. - ISBN 978-617-529-165-8
- [10] V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.
- [11] А.П. Заболотный, Д.В. Федоша, Ю.В. Даус Побудова структури мереж електропостачання споживачів АПК, що містять джерела «малої генерації» // Вісник ХНТУСГ. Технічні науки «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2011. – №. 116. – с. 20-21.
- [12] Keshtkar A., Arzanpour S., Keshtkar F. Adaptive Residential Demand-Side Management Using Rule-Based Techniques in Smart Grid Environments. Energy Build. 2016, 133, 281–294.
- [13] Espe E., Potdar V., Chang E. Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions. Energies 2018, 11 (10).
- [14] Verschae R., Kato T., Matsuyama T. Energy Management in Prosumer Communities: A Coordinated Approach. Energies 2016, 9 (7), 562.
- [15] V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.
- [16] А.П. Заболотный, Ю.В. Даус Формалізація процедури підключення джерел розподіленої генерації до електричних мереж. // Вісник ТДАТУ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2015. –№. 3. – с.37- 41.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2024



## ALGORITHM FOR FORMATION OF OPTIMUM SCHEMATIC SOLUTIONS OF LOCAL ELECTRICAL POWER SYSTEMS CONTAINING RENEWABLE SOURCES OF ELECTRIC ENERGY

- ZABOLOTNYI A.P. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the power supply of industrial enterprises department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: zap@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8696-661X;
- FEDOSHA D.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the power supply of industrial enterprises department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: fdv@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0683-0561;
- DIACHENKO V.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the power supply of industrial enterprises department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: div.epp@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8705-9683.

**Purpose.** Formation of optimal circuit design solutions of the local mains with renewable power supply with take apart the minimum losses of electrical energy and reduct discounted costs.

**Methodology.** Math model of local mains with renewable power supply. The decomposition and reduction method for the structures of mains that are optimized. The method of potential surfaces. Methods of parametric optimization for the circuit design solutions.

**Findings.** It is noted that although the share of the renewable power supply continues to grow and develop rapidly, the industry still faces many challenges as: reduce electricity losses and annual costs, improve operation and maintenance efficiency, maintain mains stability, ensure safety and reliability of the power supply system with the renewable power supplies.

It is shown that an effective solution to these problems is possible only on the basis of the analysis of the prospects for the development of the local mains with renewable power supplies, the development of technical and organizational support mechanisms that will contribute to the construction of modern circuit design solutions.

**Originality.** It is proposed to apply the potential surface method for create the optimal structure of the local mains with renewable power supplies during its design and modernization, which allows optimizing the mains structure with take apart the minimum losses of electrical energy and reduct discounted costs.

**Practical value.** The algorithm of forming the structure of power supply systems is described, which realizes the simultaneous solution of the tasks of determining the count of the load nodes, distributing power receivers between them, determining the design of power supply, taking into account the discreteness of the design of the system elements.

The proposed formalized method of building optimal the circuit design solutions of the local mains with renewable power supplies during its design and modernization, which allows optimizing the mains structure with take apart the minimum losses of electrical energy and reduct discounted costs.

In addition, based on the joint use of evaluation and optimization models, the proposed method allows optimizing the loading of cable lines, which leads to a decrease in losses in them.

The results of numerical modeling based on the proposed algorithm are presented on the example of solving the problem of reconstruction of a section of the city mains after added renewable power supplies to it..

**Keywords:** renewable energy supply; method of potential surfaces; mains structure; load node; electric receiver; loss of electrical energy.

### REFERENCES

- [1] Denisjuk S.P., Beloha G.S., Cherneshhuk I.S., Lisij V.V. (2022). Svitovi tendencii vprovadzhennja vidnovljuva-nih dzherel energii ta osoblivosti ih realizacii pri vidnovlenni ekonomiki Ukraïni // Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija. 4, 7–28.
- [2] Prahovnik A.V. (2007). Malaja jenergetika: raspredelen-naja generacija v sistemah jelektrosnabzhenija. Osvita Ukraïni, 464.
- [3] Kjaer S.B., Pedersen J.K., Blaabjerg F. (2005). A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. IEEE Trans. Ind. Appl. 41(5), 1292–1306.
- [4] Meneses D., Blaabjerg F., García O., Cobos J.A. (2013). Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application. IEEE Trans. Power Electron. 28(6), 2649–2663.
- [5] Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. (2000). Embedded Generation. London; IEE, 273 p.
- [6] Barker Ph. P., De Mello R.W. (2000). Determining

- the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 222 - 233.
- [7] Papathanassiou S.A., Hatziargyriou N.D. (2001). Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15 - 19, 134 - 138.
- [8] Denisjuk S.P., Mahlin P.V., Shram O.A., Slin'ko V.M. (2022). Osoblivosti analizu rezhimiv roboti ener-gosistemi u rajonah z al'ternativnimi dzherelami elektroenergiï (vitrovimi elektrostancijami) // Tehn. elektrodinamika. 1. 41–49.
- [9] Fedosha D.V., Zabolotnyj A.P. (2017). «Sintez jenergojeffektivnyh struktur sistem cehovogo jelektrosnabzhenija radial'noj topologii» - Zaporizhzhja: ZNTU, 126, ISBN 978-617-529-165-8
- [10] V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, (2019). "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.
- [11] A.P. Zabolotnij, D.V. Fedosha, Ju.V. Daus (2011). Pobudova strukturi merezh elektropostachannja spozhivachiv APK, shho mistjat' dzherela «maloi generacii» // Visnik HNTUSG. Tehnichni nauki «Problemi energozabezpechennja ta energozberezhennja v APK Ukraïni». 116, 20-21.
- [12] Keshtkar A., Arzanpour S., Keshtkar F. (2016). Adaptive Residential Demand-Side Management Using Rule-Based Techniques in Smart Grid Environments. Energy Build, 133, 281–294.
- [13] Espe E., Potdar V., Chang E. (2018). Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions. Energies, 11 (10).
- [14] Verschae R., Kato T., Matsuyama T. (2016). Energy Management in Prosumer Communities: A Coordinated Approach. Energies, 9 (7), 562.
- [15] V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, (2020). "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), , pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.
- [16] A.P. Zabolotnij, Ju.V. Daus (2015). Formalizacija proceduri pidkljuchennja dzherel rozpodilenoï generacii do elektrichnih merezh. // Visnik TDATU «Problemi energozabezpechennja ta energozberezhennja v APK Ukraïni». 3, 37- 41.

## МЕТОДИКА ПЕРЕДПРОЄКТНОГО ВИБОРУ КОМПОНЕНТІВ FRV КВАДРОКОПТЕРНОГО ТИПУ ЗА ЗАДАНИМИ ЗНАЧЕННЯМИ ТЯГИ, ШВИДКОСТІ ТА ЧАСУ ПОЛЬОТУ

- МАЛИЙ О.Ю.** канд. техн. наук, доцент, в.о. завідувача кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: docsasha2@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8457-8154;
- ПОСПЕЄВА І.Є.** старший викладач кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: iris191259@gmail.com, ORCID: 0009-0004-7100-9245;
- ФУРМАНОВА Н.І.** канд. техн. наук, доцент, декан факультету інформаційної безпеки та електронних комунікацій Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: nfulmanova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8670-2948;
- ОНИЩЕНКО В.Ф.** канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: vfonish@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4213-7131;
- ЗАЛУЖНИЙ М.Ю.** ст. викладач кафедри електропривода та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: myz.nuzp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1254-7498
- ІВАНОВ В.В.** студент магістратури Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kvet151.9@gmail.com, ORCID: 0009-0005-9445-4437.

**Мета роботи.** Розробити методуку передпроектного вибору компонентів БПЛА квадрокоптерного типу для створення дронів на основі заданих критеріїв.

**Методи дослідження.** Математичний аналіз та моделювання.

**Отримані результати.** У статті розроблено, реалізовано та оцінено модульну структуру, яка дозволяє операторам швидко зібрати без інструментів мультироторний безпілотний літальний апарат (MP-БПЛА) із індивідуальними характеристиками польоту для виконання вимоги місії. Розроблено поетапний процес вибору апаратних компонентів (датчиків, приводів, гвинта, двигунів, акумуляторів, електронних регуляторів швидкості) для модулів рамки для досягнення бажаних характеристик. Розроблено програмний засіб, який оптимізує процес вибору компонентів обладнання та розрахунок часу польоту. Перевірено алгоритм розрахунку часу польоту на основі даних безціткового двигуна та гвинта, зібраних за допомогою тягового стенду/динамометра. Фреймворк складається з п'яти модулів (контролер, трансмісія, відео, зв'язок і корисне навантаження), що дозволяє користувачеві комбінувати модулі, щоб швидко зібрати MP-БПЛА, який найкраще відповідає вимогам бажаного застосування. Для перевірки дизайну фреймворку було реалізовано та протестовано прототип. Фреймворк був використаний для створення 3 модульних профілів MP-БПЛА, один для спостереження (тривалий час польоту), один для доставки (більший корисний вантаж), а третій профіль MP-БПЛА дозволяє форму перемикання, прив'язану до джерела живлення від батареї під час польоту.

**Наукова новизна.** Запропонований у статті алгоритм базується на підході, що дозволяє адаптувати MP-БПЛА на більш високому рівні, ніж попередні системи. Інфраструктура дозволяє користувачеві налаштовувати характеристики польоту (час польоту, швидкість, максимальне корисне навантаження), а також датчики та канали зв'язку (відео та канал передачі даних) відповідно до вимог конкретної операції.

**Практична цінність.** Щоб полегшити процес вибору апаратних компонентів для модулів каркасу, в роботі представлено алгоритм для оцінки часу польоту, який включено в процес побудови модульних профілів. Алгоритм перевірено, і середня точність 98,94% була досягнута для оцінки часу польоту завершення. Представлено дизайн програмного засобу. Цей інструмент дозволяє розробникам аналізувати дані про безціткові двигуни та гвинти (отримані зі стенду тяги), оцінювати, як повна вага та вибір батареї впливають на MP-БПЛА (щодо часу польоту, співвідношення тяги до ваги та максимального корисного навантаження), а також оптимізує процес розробки MP-БПЛА.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; компоненти; автоматизоване проектування; польотний контролер; двигун; електронний контролер швидкості.

## I. ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) – це технологія, що швидко розвивається і має великий потенціал у найрізноманітніших областях [1], [2], [3].

Військово-повітряні сили Сполучених Штатів визначають БПЛА як «літальний апарат, який не має людини-оператора та здатний літати з дистанційним керуванням або без нього» [4].

Найпоширенішими типами БПЛА є гвинтокрилі та мультироторні БПЛА (МР-БПЛА) [5], [6]. Останні мають переваги перед іншими категоріями завдяки своїй здатності зависати в 3D-просторі та високій маневреності.

Крім того, БПЛА поділяються на класи відповідно до їх ваги: клас 1 (менше 150 кг), клас 2 (від 150 кг до 600 кг) і клас 3 (більше 600 кг) [7].

Конструкції БПЛА почали активно розвиватися з розвитком систем дистанційного керування: з'явилася безліч різновидів за розмірами, призначенням та конфігурацією розташування двигунів. Але створення нових моделей потребує певних трудовитрат і часу, і для скорочення часу їх проектування слід активно застосовувати сучасні методи автоматизації проектування – CAD-CAM-CAE системи.

Найширше застосування БПЛА знайшли у військовій сфері: вони дозволяють не тільки робити знімки з території супротивника, але й перехоплювати сигнали стільникового зв'язку, вражати цілі з великих відстаней з високою точністю, самознищуватись, не залишаючи слідів. Найменші БПЛА можуть вбудовуватися в щілини та проводити зйомку звідти.

В цивільній галузі БПЛА також виконують велику кількість завдань: фото- та відеозйомка, транспортування вантажів, створення карт місцевості, обстеження важкодоступних та віддалених ділянок, моніторинг та охорона об'єктів, усунення надзвичайних ситуацій, пошук людей та багато інших операцій [8].

Необхідність застосування БПЛА в широкому діапазоні завдань висуває до них дуже різноманітні вимоги: наприклад, для спостереження потребується висока тривалість польоту з малою вагою, а для доставки – перевезення максимального корисного вантажу протягом короткого часу, що призводить до зменшення швидкості та маневреності. Все це потребує вибирати відповідний БПЛА на основі критеріїв кінцевого призначення, дизайну та індивідуальних потреб.

Таким чином, для реалізації різних завдань військові організації повинні придбати численні моделі БПЛА, кожна з яких буде корисною для певного типу застосування. Однак наявність кількох моделей може призвести до ускладнення програм навчання, оскільки користувачі повинні навчитися працювати з різними системами, моделями та

виробниками.

Всі ці вимоги потребують проведення досліджень концепції модульної структури БПЛА, яка дозволила б одній системі відповідати вимогам усіх БПЛА.

У даній статті пропонується модульна структура, яка дозволяє військовим операторам швидко зібрати БПЛА, який відповідатиме вимогам їх застосування, шляхом вибору та підключення набору модулів.

Дослідження, представлені в цій статті, зосереджені виключно на МР-БПЛА класу 1.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сфері робототехніки модульні системи визначаються як «системи, які складаються з модулів, які можна від'єднувати та повторно з'єднувати в різних схемах, щоб сформувати нову конфігурацію, що забезпечує нові функції» [9]. На основі цього визначення модульний МР-БПЛА – це система, яка дозволяє користувачеві вибирати компоненти відповідно до часу польоту, можливостей корисного навантаження, датчиків і приводів.

Використання модульної конструкції має ряд переваг, серед яких основними є:

- можливість адаптувати характеристики польоту БПЛА (час польоту, здатність перевозити корисний вантаж);
- можливість адаптувати канали зв'язку (канал передачі даних і відео);
- здатність додавати певні функції, необхідні для виконання різних місій, шляхом додавання датчиків і приводів;
- покращення логістики;
- скорочення часу навчання;
- покращення ремонтпридатності;
- зниження загальної вартості.

Таким чином, модульний МР-БПЛА може забезпечити прямі переваги для військових операцій з точки зору зручності використання, а також для військових організацій з точки зору логістики та вартості [10], [11].

Дві важливі концепції, визначені в роботі, – це модуль БПЛА та профіль БПЛА.

Модуль БПЛА складається з модульного компонента, який можна підключити до МР-БПЛА для додавання або зміни певної функції чи характеристики. Наприклад, можна підключити сенсорний модуль, щоб додати певну здатність чутливості, або додати модуль трансмісії, щоб досягти інших характеристик польоту.

Профіль складається з набору модулів, ретельно підібраних для виконання вимог конкретної місії. Наприклад, профіль, призначений для пошуково-рятувальних місій, забезпечить тривалий час польоту з передовими датчиками для визначення

місцезнаходження людей, тоді як профіль для доставки натомість може перевозити більш важкі корисні вантажі.

Модульні наземні роботи, здатні змінювати свою форму, вважаються цінними системами, оскільки вони можуть адаптуватися до різних завдань і середовищ. Їх модульність була досліджена на наземних роботах різної форми і навіть на розподілених роботах.

Однак модульні БПЛА не мають такої ж кількості досліджень, оскільки лише деякі дослідження досліджували цю концепцію. Одне з таких досліджень представляє Polidrone — модульна структура БПЛА з конструкцією «підключай і працюй». Polidrone дозволяє користувачеві налаштувати систему з точки зору кількості рук (від трьох до восьми) і дизайну рукоятки (один двигун, два двигуни або один двигун і один надувний елемент на руку). Конфігурації з надувним елементом у нижній частині зброї дозволяють Polidrone сідати на воду та перетнуту місцевість. Крім того, Polidrone використовує процес моделювання плавного осадження (FDM) і забезпечує максимальну злітну вагу в два кілограми. Патент Amazon описує процес використання модульних БПЛА для доставки. Залежно від вимог транспортування БПЛА збирається з різних частин на основі різних вимог (вага, маршрут, безпека, погода тощо). Однак цей патент зосереджений на процесі використання модульних БПЛА для доставки і не надає подробиць про саму модульну систему.

Крім того, модульність також була раніше досліджена в БПЛА з нерухомим крилом. Ця система складається з модульного БПЛА з нерухомим крилом, призначеного для розвідки, збору даних і загальних досліджень. Він складається з основного корпусу та модулів крил, які можна з'єднати в короткій конфігурації (два модулі крил) для швидкого та дальнього застосування, або в довгій конфігурації (4 модулі крил) для витривалості та коротких операцій зльоту та посадки. Оскільки модулі крил стандартні та взаємозамінні, систему можна розібрати і тому її легко транспортувати та ремонтувати.

У запропонованій статті підхід відрізняється від вищезазначених досліджень, оскільки в ній описується конструкція, яка дозволяє адаптувати МР-БПЛА на більш високому рівні, ніж попередні системи. Інфраструктура дозволяє користувачеві налаштувати характеристики польоту (час польоту, швидкість, максимальне корисне навантаження), а також датчики та канали зв'язку (відео та канал передачі даних) відповідно до вимог конкретної операції.

### III. МЕТА РОБОТИ

Розробка методики передпроектного вибору компонентів БПЛА квадрокоптерного типу для

складання БПЛА на основі заданих критеріїв, що веде до підвищення якості продукції, зниження матеріальних витрат на проектування, скорочення термінів проектування і, як наслідок, зменшення числа інженерно-технічних працівників, що займаються проектуванням, а також підвищення продуктивності праці.

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

Модульний каркас МР-БПЛА складається з п'яти модулів: модуль контролера, модуль трансмісії, відеомодуль, модуль зв'язку і модуль контрольного навантаження.

Модуль контролера містить необхідну електроніку для досягнення стабільного польоту в МР-БПЛА: контролер польоту, який виконує програмне забезпечення системи та керування, датчики польоту (наприклад, акселерометр, гіроскоп, барометр, компас, GPS) і плату розподілу електроенергії.

Модуль трансмісії містить обладнання, пов'язане зі створенням тяги: безщіткові двигуни, гвинти та електронні регулятори швидкості.

Відеомодуль виконує задачу передавання відеопотоку з камери для отримання зображень оператором. Він містить камеру, яка вибирається відповідно до вимог кожної місії щодо роздільної здатності, ваги та типу. Відеомодуль має два з'єднання з модулем контролера: живлення та канал передачі даних, що дозволяє відображати інформацію про політ на екрані у відео. За бажанням цей модуль також може містити підвіс для стабілізації відео.

Модуль зв'язку створює канал передачі даних між БПЛА та наземною станцією управління. Він містить радіопередавач і його антену. Для цього модуля потрібне живлення та послідовне підключення до модуля контролера.

Модуль корисного навантаження містить датчик або виконавчий механізм для певних операцій.

Процес створення нового профілю МР-БПЛА можна представити як послідовність кроків з вибору апаратних компонентів. Покроковий процес створення модульного профілю МР-БПЛА наведений на рис. 1.



**Рисунок 1.** Покроковий процес створення модульного профілю МР-БПЛА

На перших трьох кроках формуються вимоги до створюваного профілю МР-БПЛА.

На кроці 1 визначається програма, у якій буде використовуватися МР-БПЛА, вибирається виконавчий механізм і датчики, які будуть потрібні для застосування.

На кроці 2 визначаються вимоги до часу польоту – вказується бажаний час польоту (у хвилини), необхідний для виконання програми.

На кроці 3 визначаються вимоги до розмірів БПЛА; при цьому програма, зазначена на кроці 1, визначає, чи є розмір МР-БПЛА обмеженням. (Наприклад, система, яку перевозитимуть у рюкзаку, може бути обмежена певним розміром і вагою гвинта, тоді як система, яку перевозитимуть у транспортному засобі, таких обмежень не має).

Наступні чотири кроки пов'язані з безпосередньо проектуванням.

На кроці 4 проводиться оцінка загальної ваги при зльоті шляхом складання ваги всіх компонентів корисного навантаження, включаючи датчики, приводи, додаткові батареї (корисного навантаження) та упаковку (доставку).

На кроці 5 обираються компоненти трансмісії. База даних трансмісії містить інформацію про комбінації безщіткових двигунів і пропелерів, і на цьому кроці її слід відфільтрувати відповідно до вимог корисного навантаження та часу польоту, які пред'являються для проектного профілю. Увага приділяється тим комбінаціям двигунів і гвинтів, які відповідають вимогам, зазначеним у кроках 1, 2 і 4. Якщо на кроці 3 було вказано обмеження за розмірами, перевагу слід віддати варіанту, який відповідатиме вищевказаним вимогам з мінімальним розміром пропелера. В протилежному випадку слід прагнути до комбінації, яка відповідатиме вимогам щодо ваги (крок 4) за максимального часу польоту

(крок 2). Для оптимізації цього процесу рекомендується використовувати програмне забезпечення.

На кроці 6 проводиться розрахунок часу польоту. Для його оцінки при проектуванні МР-БПЛА слід визначити вимоги до корисного навантаження та параметрів акумулятора (вага, напруга, ємність).

Кроки 5 і 6 можуть вимагати кількох ітерацій, щоб переконатися, що вага батареї потребує нового коригування для двигунів і пропелерів.

На кроці 7 відбувається впровадження та налаштування спроектованого профілю МР-БПЛА.

На останньому кроці 8 відбувається тестування, після чого прототип вважається готовим до льотних випробувань.

Таким чином, однією з найважливіших характеристик МР-БПЛА є час польоту. Його можна інтерпретувати як функцію корисної ємності акумулятора та необхідної потужності для польоту. Для оцінки часу польоту слід попередньо визначити такі параметри, як тяга БПЛА, ефективність гвинта, ємність акумулятора, вага БПЛА та маса корисного вантажу.

Нижче наведений алгоритм, який базується на алгоритмі, представленою в [12], з деякими додатковими даними, серед яких ефективність двигуна, параметри електронних компонентів і споживання енергії корисного навантаження, а також обмеження на розряд акумулятора (що є важливим для літій-полімерних акумуляторів, які не слід повністю розряджати, оскільки це спричиняє фізичному пошкодженню елементів).

Загальна ємність батареї  $C_{\text{бат.з}}$  (Вт/год.) розраховується за формулою:

$$C_{\text{бат.з}} = Q \cdot n_e \cdot 3,7,$$

де  $Q$  – електричний заряд, А/год;

$n_e$  – кількість елементів.

Корисна ємність батареї  $C_{\text{бат.к}}$  (Вт/год.) (враховуючи, що літій-полімерні батареї не слід повністю розряджати), визначається за формулою:

$$C_{\text{бат.к}} = C_{\text{бат.з}} \cdot k,$$

де  $k$  – межа розряду.

Повна маса БПЛА  $m$  (кг) розраховується за формулою:

$$m = m_{\text{БПЛА}} + m_{\text{бат}} + m_{\text{ки}},$$

де  $m_{\text{БПЛА}}$  – маса безпосередньо БПЛА;

$m_{\text{бат}}$  – маса батареї;

$m_{\text{ки}}$  – маса корисного навантаження.

Необхідна тяга на пропелер для зависання під час польоту  $P_{np}$  (кг) визначається за формулою:

$$P_{np} = \frac{m}{n_{np}},$$

де  $n_{np}$  – кількість пропелерів.

Коефіцієнт корисної дії гвинта  $E_{zg}$  (Н/Вт) являє собою співвідношення створюваної тяги до механічної потужності, необхідної для його обертання:

$$E_{zg} = \frac{P}{N_m} = \frac{P}{M \cdot \omega},$$

де  $P$  – тяга, Н;

$N_m$  – механічна потужність, Вт;

$M$  – крутний момент, Н·м;

$\omega$  – кутова швидкість обертання, рад./с.

Загальна ефективність  $E$  (Н/Вт) визначається за формулою:

$$E = \eta \cdot E_{zg},$$

де  $\eta$  – ККД двигуна, %.

Механічна потужність для зависання БПЛА  $N_m$  (Вт) визначається за формулою:

$$N_m = \frac{m}{E \cdot P_{np}}.$$

Загальна потужність  $N$  (Вт), необхідна БПЛА, визначається за формулою:

$$N = N_m + N_{ea} + N_{en},$$

де  $N_{ea}$  – електрична потужність авіоніки;

$N_{en}$  – електрична потужність корисного навантаження.

Час польоту  $FT$  (хв) можна оцінити за формулою:

$$FT = \frac{C_{bat.k}}{N \cdot 60}.$$

Таким чином, час польоту безпосередньо залежить від споживаної потужності МР-БПЛА. Хоча електронні схеми на борту МР-БПЛА можуть надавати значення споживаної потужності, ці значення залежать від калібрування бортового датчика струму, яке в разі неправильного виконання може надати неточні значення. Тому для надійного та послідовного розрахунку часу польоту незалежно від бортової електроніки слід дотримувалися наступної послідовності етапів:

- підключити повністю заряджену батарею до

МР-БПЛА;

- надати команду МР-БПЛА на зліт до 3 м;

- забезпечити автономне зависання БПЛА протягом 10 хв;

- приземлити БПЛА та вийняти акумулятор;

- повністю зарядити батарею, записуючи енергоємність, що передається від зарядного пристрою до батареї;

- обчислити споживання електроенергії за хвилину  $N_{xe}$  (Вт/хв.) за формулою:

$$N_{xe} = \frac{N_{nep}}{t(10x6)},$$

де  $N_{nep}$  – потужність перезаряду, Вт.

В результаті час польоту  $FT$  становить:

$$FT = \frac{C_{bat.k} \cdot k_3}{N_{xe}},$$

де  $k_3$  – коефіцієнт запасу ємності батареї.

Для виключення випадкової похибки вимірювань наведені етапи були повторені протягом трьох польотів, і за результатами був обчислений середній час польоту.

Крім того, для перевірки алгоритму з різними багатороторними конфігураціями процедури також повторювалися під час польоту з використанням трьох різних прототипів МР-БПЛА. Прототипи включали різну кількість елементів батареї, вагу, швидкість двигуна (KV) і гвинти різного розміру.

Для перших двох прототипів експеримент проводився у двох режимах: без корисного навантаження та з корисним навантаженням у 500 г. Третій прототип випробувався тільки без корисного навантаження, оскільки додаткова вага знизилася б співвідношення тяги до ваги МР-БПЛА до рівня з 2 до 1.

Вихідні дані та результати експериментів зведені до табличного виду. У табл. 1 наведені технічні характеристики кожного прототипу, використаного для перевірки алгоритму оцінки часу. У табл. 2 наведені: вимірний час польоту для кожного прототипу FT (хв.), енергоспоживання РС (мА год.) для кожного з трьох польотів та середній час польоту. У табл. 3 представлено порівняння між вимірним часом польоту та розрахунковим часом польоту з використанням алгоритму, наведеного вище.

Як видно, найвища точність оцінки польоту була досягнута з прототипом P2 (99,72% без корисного вантажу, 98,96% з 500-грамовим корисним вантажем). Найнижча точність оцінки (97,97%) була досягнута з прототипом P3.

Загалом, середня точність усіх п'яти перевірених сценаріїв склала 98,94%, що підтверджує, що цей

алгоритм можна використовувати для оцінки часу польоту безщіткового двигуна МР-БПЛА.

Оптимізація часу польоту вимагає пошуку балансу між ефективністю пропелера та безщіткового двигуна. Збільшення розміру гвинта збільшує його ефективність, однак це також збільшує крутний момент, необхідний для його обертання. З іншого боку, безщіткові двигуни демонструють високу ефективність при обертанні на високих швидкостях з низьким крутним моментом.

**Таблиця 1.** Прототипи МР-БПЛА, що використовувалися для перевірки алгоритму оцінки часу польоту

Номер прототипу	1	2	3
Тип двигуна	EMAX 2213 935Kv	EMAX 3510 600Kv	EMAX 2213 935Kv
Тип гвинта	APC 10x45MR	APC 15x55MR	APC 10x45MR
Вага, г	920	1370	920
Тип батареї	4 cell 4500mah	4 cell 4500mah	3 cell 500mah
Вага батареї, г	447	447	460

**Таблиця 2.** Прототипи МР-БПЛА, що використовувалися для перевірки алгоритму оцінки часу польоту

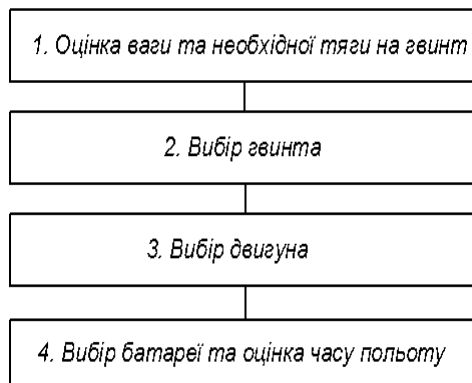
Прототип	Режим	Вимірювання 1		Вимірювання 2		Вимірювання 3		Середнє
		PC	FT	PC	FT	PC	FT	
P1	без навантаження	1950	18,46	1920	18,75	1870	19,25	18,82
P1	з 0,5 кг навантаження	2930	12,28	3070	11,72	2930	12,28	12,09
P2	без навантаження	1611	22,34	1720	20,93	1680	21,42	21,56
P2	з 0,5 кг навантаження	2531	14,22	2630	13,68	2620	13,74	13,88
P3	без навантаження	2530	17,39	2630	16,73	2600	16,92	17,01

**Таблиця 3.** Порівняння між вимірним і розрахунковим часом польоту

Прототип	Режим	Середній вимірний польотний час (хв)	Розрахунковий час польоту (хв)	Точність
P1	без навантаження	18,82	19,05	98,78%
P1	з 0,5 кг навантаження	12,09	12,01	99,25%
P2	без навантаження	21,56	21,51	99,72%
P2	з 0,5 кг навантаження	13,88	13,74	98,96%
P3	без навантаження	17,01	16,67	97,97%
Середня точність оцінки				98,94%

Таким чином, незважаючи на те, що збільшення розміру гвинта збільшить ефективність гвинта, це зменшить ефективність двигуна через більший попит на крутний момент, тому для підвищення загальної ефективності польоту та часу польоту слід забезпечувати баланс між ефективністю гвинта та двигуна.

На рис.2 показаний алгоритм оптимізації, представлений вперше та реалізований за допомогою програмного інструменту Multi-Rotor Designer.



**Рисунок 2.** Покроковий процес вибору двигуна та гвинта для ефективного МР-БПЛА



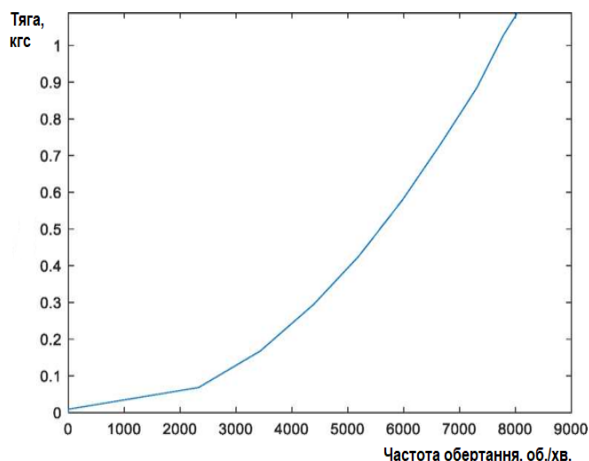
Нижче наведений порядок роботи алгоритму.

Крок 1. Проективальник оцінює вагу кінцевого продукту для розрахунку необхідної тяги на гвинт. Обрані гвинт, двигун і батарея впливатимуть на кінцеву вагу МР-БПЛА.

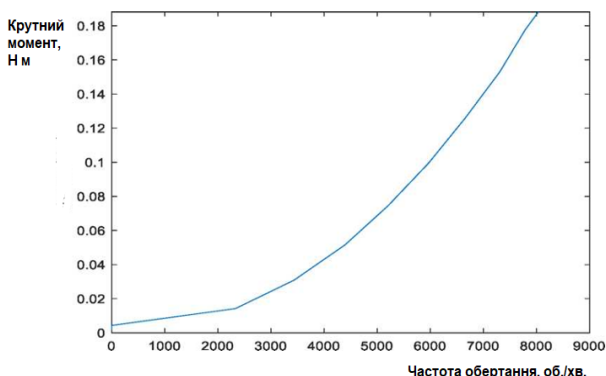
Крок 2. На попередньому кроці визначається тяга, необхідна для гвинта. Для визначення тяги, крутного моменту та швидкості обертання від різних гвинтів, що використовують той самий двигун, можна використовувати стенд тяги, наприклад, RCBenchmark 1585.

Дані гвинта можна аналізувати незалежно від двигуна, оскільки генерована тяга є функцією швидкості обертання. Для отримання необхідної інформації під час процесу вибору гвинта слід побудувати графіки залежності тяги від обертів на хвилину, крутного моменту від обертів на хвилину та ефективності гвинта.

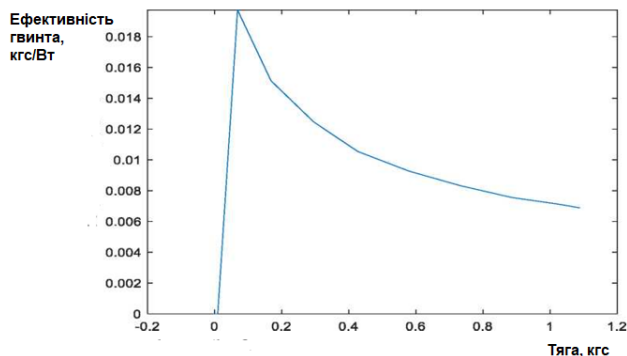
Приклади цих графіків наведені на рис. 3 - 5.



**Рисунок 3.** Приклад графіка залежності тяги (кгс) від частоти обертання (об./хв.), який використовувався при виборі гвинта

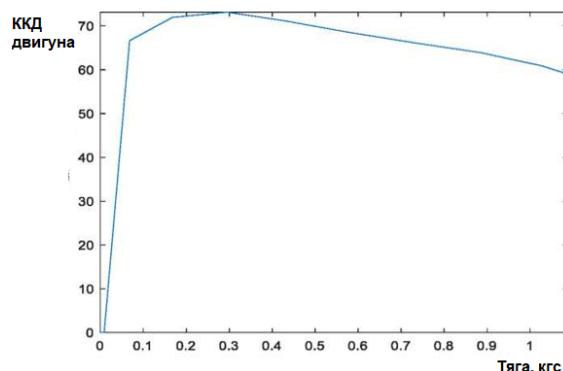


**Рисунок 4.** Приклад графіка залежності крутного моменту (Н·м) від частоти обертання (об./хв.), який використовувався при виборі гвинта



**Рисунок 5.** Приклад графіка залежності ефективності гвинта (кгс/Вт) від тяги (кгс), який використовувався при виборі гвинта

Крок 3. Після вибору гвинта стенд можна використовувати для його перевірки з різними двигунами. Побудова графіка залежності ККД двигуна від тяги (рис. 6) дозволяє вибрати найбільш ефективний двигун для досягнення бажаної тяги за допомогою попередньо вибраного гвинта.



**Рисунок 6.** Приклад графіка залежності ККД двигуна від тяги (кгс) від тяги (кгс), який використовувався при виборі гвинта

Крок 4. На останньому кроці вибирається акумуляторна батарея за допомогою ітераційного процесу з використанням алгоритму оцінки часу польоту, представленого вище. При цьому вибраний двигун, гвинт і батарея можуть змінити розрахункову масу МР-БПЛА, і в цьому випадку кроки 1 – 4 можна повторити, щоб переконатися, що вибрані компоненти залишаються найефективнішими з оновленою вагою.

Для реалізації системи керування, програмного забезпечення, електричної та бездротової комунікаційної частини були використані різні електричні компоненти, такі як безщітковий двигун постійного струму (BLDC), електронний регулятор швидкості (ESC), мультикомп'ютерна плата KK2, яка є пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором (PID-регулятором) розробленої системи, і серводвигун з високим крутним моментом. Була

розроблена програма GPS-відстеження для Android для відстежування його маршруту, а також було використане програмне забезпечення для IP-камери [15], щоб отримати потокове відео з БПЛА в реальному часі.

На рис. 7 - 9 показані системи керування креном, тангажем і ризанням.

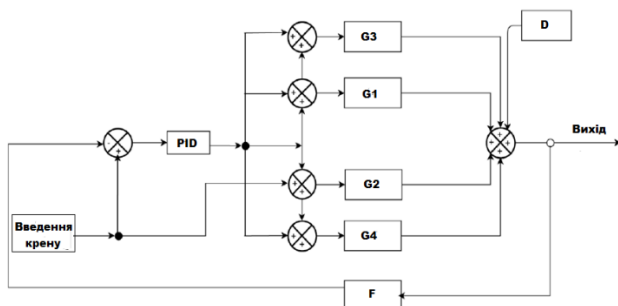


Рисунок 7. Система керування креном (Roll)

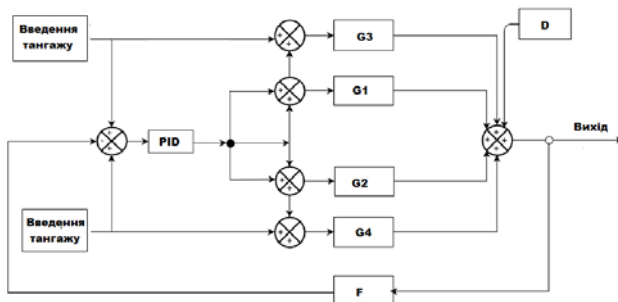


Рисунок 8. Система керування тангажем (Pitch)

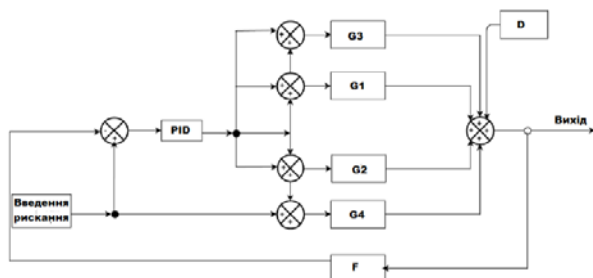


Рисунок 9. Система керування ризанням (Yaw)

Позначення на рис. 7 – 9:

- G1 – функція передачі лівого переднього BLDC;
- G2 – Функція передачі двигуна правого переднього BLDC ( $G2 = G1$ );
- G3 – функція передачі лівого заднього BLDC;
- G4 – функція передачі правого заднього BLDC ( $G4 = G3$ );
- PID – функція передачі PID-регулятора;
- D – гаусівський шум (перешкоди);
- F – зворотний зв'язок.

Для моделювання процесів у двигунах

використовувався інструментарій Simulink.

У якості BLDC був використаний безщітковий роторний двигун Emax BL4030 масою 326 г і потужністю 1300 Вт. Передавальна характеристика, визначена на основі його параметрів, має вигляд [13]:

$$G1(s) = \frac{416,67}{0,38 \cdot s^2 + 0,82 \cdot s + 1}$$

Відповідь на ступінчасту реакцію розімкненого контуру двигуна BLDC, отримана за допомогою інструментів Simulink, показана на рис. 10.

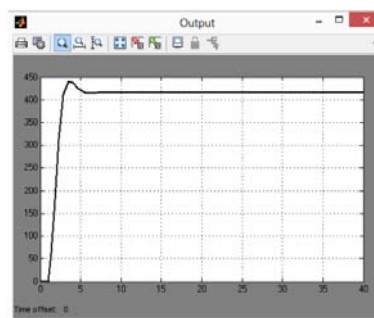


Рисунок 10. Відповідь на ступінчасту реакцію розімкненого контуру двигуна BLDC

У якості серводвигуна був використаний серводвигун постійного струму Futaba S-140. Його лінійна математична модель (передаточна функція) має вигляд [14]:

$$G1(s) = \frac{950}{s^2 + 44 \cdot s + 950}$$

Крок реагування розімкненого контуру серводвигуна показаний на рис. 11.

На рис. 12 - 14 наведені моделі керування креном, ризанням та тангажем, виконані у Simulink, на рис. 15 - 17 – відповідні їм виходи.

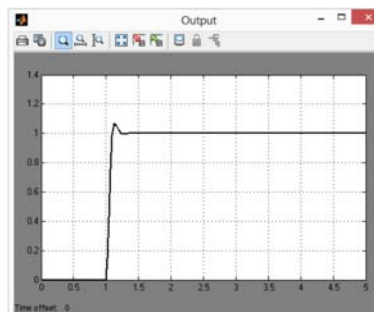


Рисунок 11. Крок реагування розімкненого контуру серводвигуна постійного струму

Для кожної з систем керування креном, ризанням та тангажем за допомогою рис. 12 - 14 і рівнянь 3, 4 були обчислені відповідні передатні

функції, а також побудовані графіки ступінчастої реакції, діаграми Найквіста і графіки Боде. Для цього були створені відповідні m-файли [16 - 18].

Функція передачі системи керування креном визначається за допомогою файлу roll.m

Вміст файлу roll.m

clc

s = tf('s');

P = 0.5;

G1 = 416.67/(0.38\*s^2+0.82\*s+1);

G2 = 416.67/(0.38\*s^2+0.82\*s+1);

G3 = 950/(s^2+40\*s+950);

G4 = 950/(s^2+40\*s+950);

D = rand;

```
systemTransferFunction =
((P*(G1+s*G2+G3+G4))+P*(G1+s*G2+G3+G4)*D)/(1
+(P*(G1+s*G2+G3+G4))*(1024/(s+1024)));
```

```
Drone = zpk(systemTransferFunction); %transfer
function
```

figure;

step(Drone);

figure;

nyquist(Drone), grid;

figure;

bode(Drone), grid;

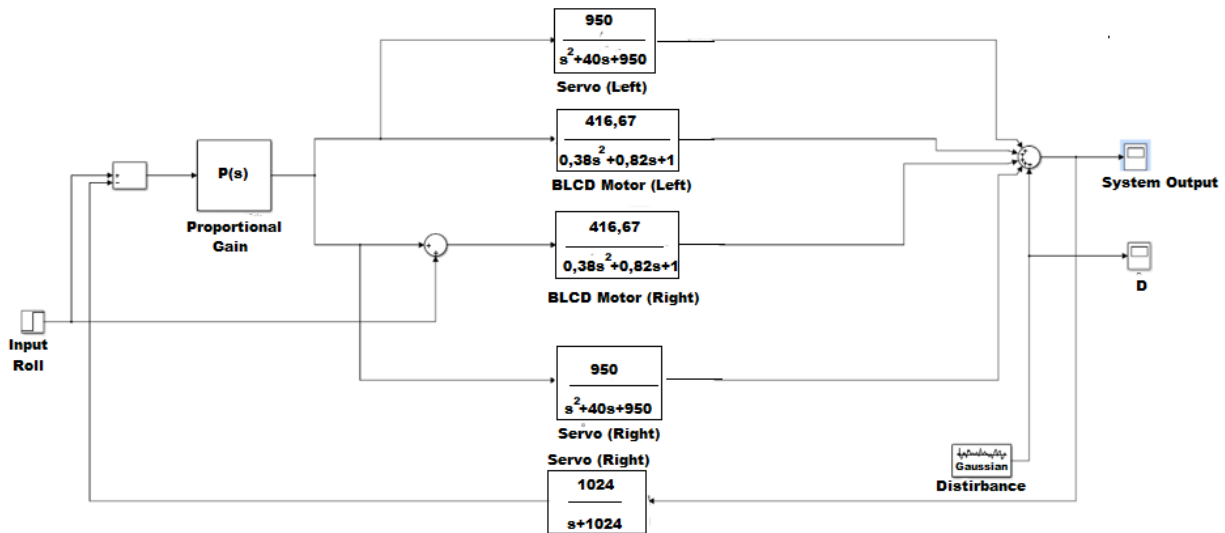


Рисунок 12. Модель системи керування креном в Simulink

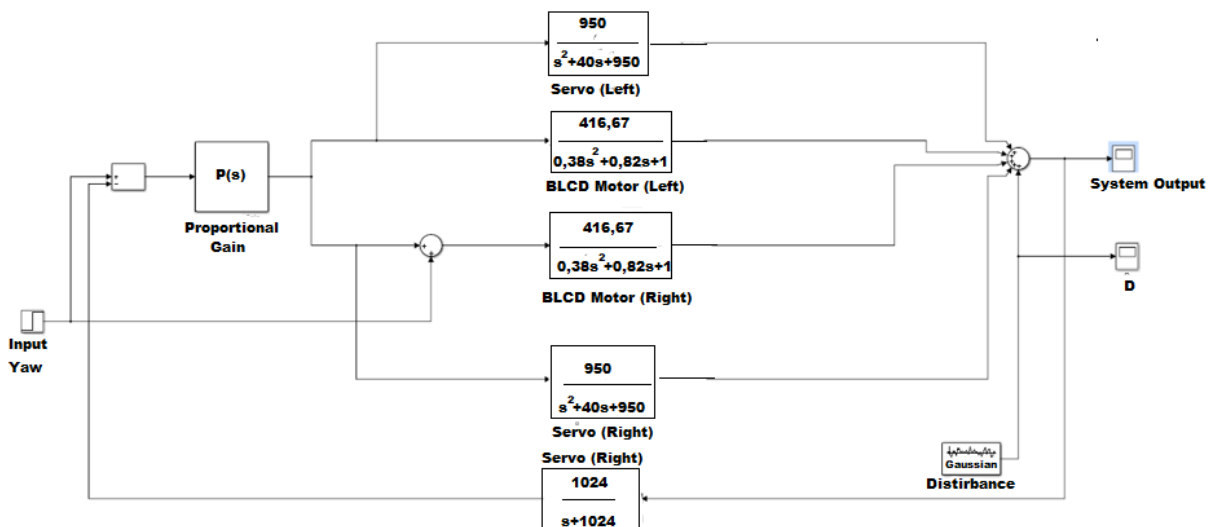


Рисунок 13. Модель системи керування (креном, ристанням або тангажем) в Simulink

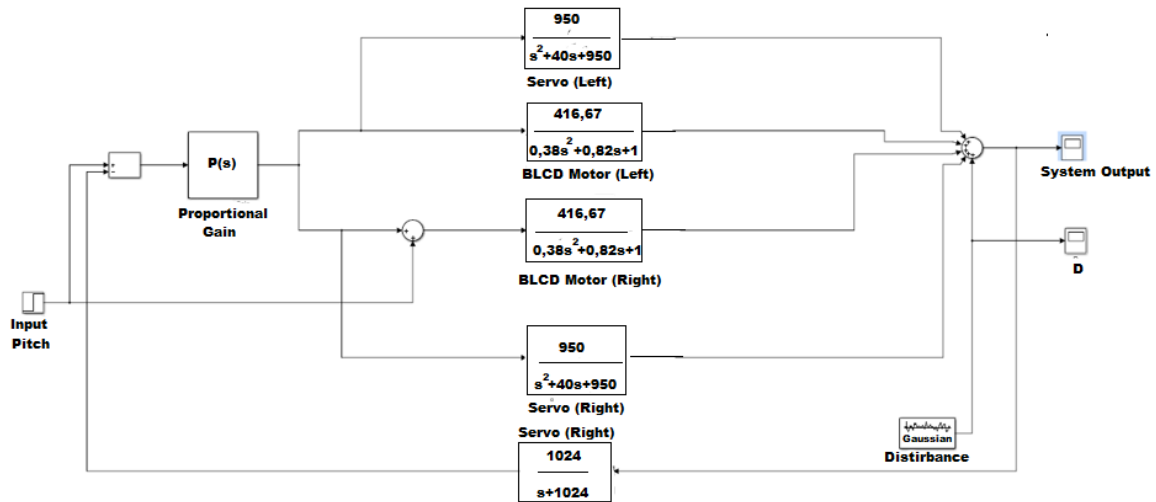


Рисунок 14. Модель системи керування тангажем в Simulink

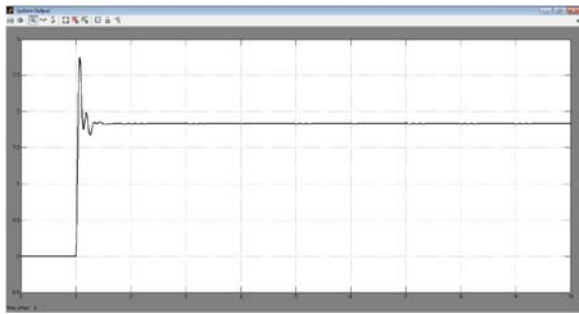


Рисунок 15. Вихід моделі Simulink системи керування креном

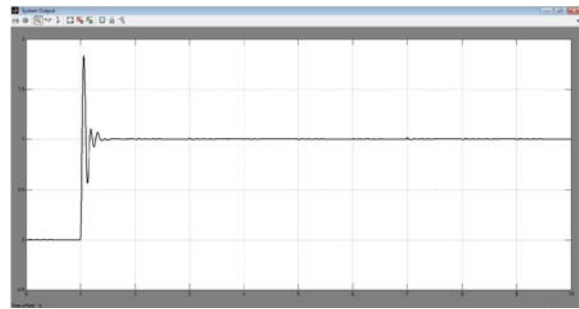


Рисунок 16. Вихід моделі Simulink системи керування ристанням

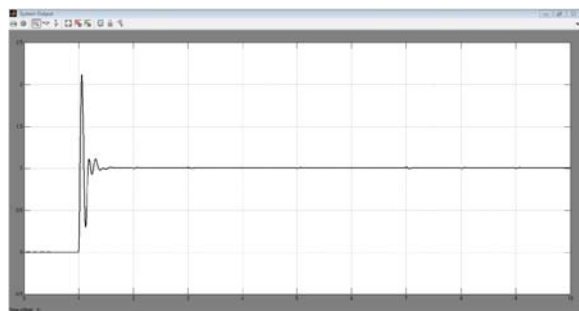


Рисунок 17. Вихід моделі Simulink системи

керування тангажем

Передатна функція системи керування креном має вигляд:

$$T_{roll}(s) = \frac{P \cdot (G1 + sG2 + G3 + G4) \cdot (1 + D)}{1 + P \cdot (G1 + sG2 + G3 + G4) \cdot \frac{1024}{s + 1024}}$$

Значення  $T_{roll}(s)$  є передатною функцією системи керування креном БПЛА з використанням усіх обов'язково достатніх доступних параметрів.

Графік ступінчастої реакції системи керування креном наведений на рис. 18, діаграм Найквіста – на рис. 19, графік Бode - на рис. 20.

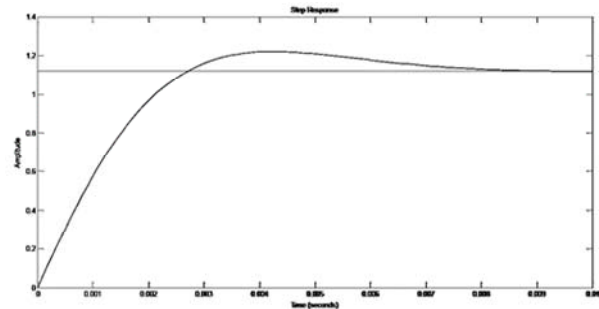
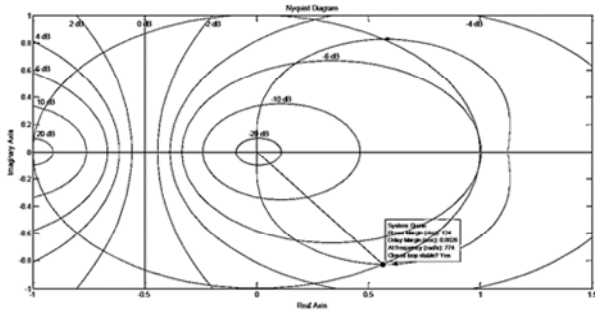
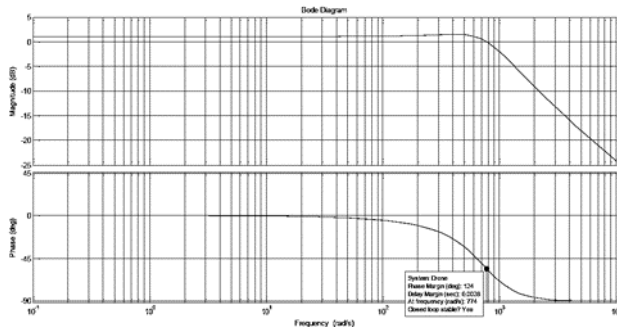


Рисунок 18. Ступінчаста реакція системи керування креном



**Рисунок 19.** Схема Найквіста системи керування креном



**Рисунок 20.** Графік Bode Plot системи керування креном

Функція передачі системи керування рисканням визначається за допомогою файлу yaw.m

Вміст файлу yaw.m:

clc

s = tf('s');

P = 0.5;

G1 = 416.67/(0.38\*s^2+0.82\*s+1);

G2 = 416.67/(0.38\*s^2+0.82\*s+1);

G3 = 950/(s^2+40\*s+950);

G4 = 950/(s^2+40\*s+950);

D = rand;

```
systemTransferFunction =
((P*(G1+s*G2+G3+s*G4))+(P*(G1+s*G2+G3+s*G4))*
D)/(1+(P*(G1+s*G2+G3+s*G4))*(1024/(s+1024)));
```

```
Drone = zpk(systemTransferFunction); %transfer
function
```

```
figure;
```

```
step(Drone);
```

```
figure;
```

```
nyquist(Drone), grid;
```

```
figure;
```

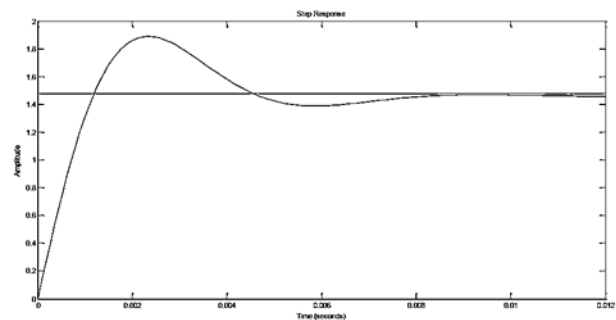
bode(Drone), grid;

Передатна функція системи керування рисканням має вигляд:

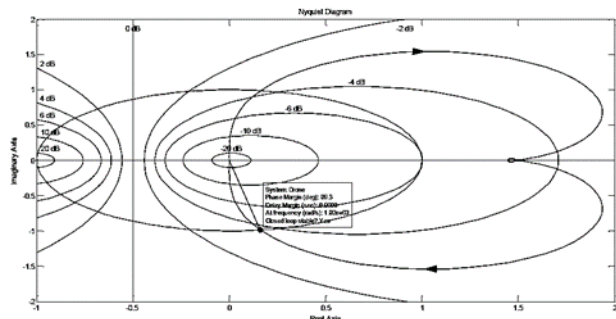
$$T_{yaw}(s) = \frac{P \cdot (G1 + sG2 + G3 + G4) \cdot (1 + D)}{1 + P \cdot (G1 + sG2 + G3 + G4) \cdot \frac{1024}{s + 1024}}$$

Значення  $T_{yaw}(s)$  є передатною функцією системи керування поворотом БПЛА з використанням усіх обов'язково достатніх доступних параметрів.

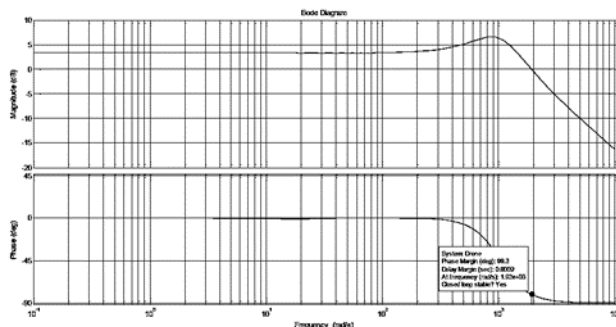
Графік ступінчастої реакції системи керування поворотом наведений на рис. 21, діаграм Найквіста – на рис. 22, графік Бодє – на рис. 23.



**Рисунок 21.** Ступінчаста реакція системи керування поворотом



**Рисунок 22.** Схема Найквіста системи керування поворотом



**Рисунок 23.** Графік Bode Plot системи керування поворотом

Функція передачі системи керування тангажем визначається за допомогою файлу pitch.m

Вміст файлу pitch.m

```
clc
s = tf('s');
P = 0.5;
G1 = 416.67/(0.38*s^2+0.82*s+1);
G2 = 416.67/(0.38*s^2+0.82*s+1);
G3 = 950/(s^2+40*s+950);
G4 = 950/(s^2+40*s+950);
D = rand;

systemTransferFunction =
((P*(G1+G2+s*G3+s*G4))+(P*(G1+G2+s*G3+s*G4))*
D)/(1+(P*(G1+G2+s*G3+s*G4))*(1024/(s+1024)));

Drone = zpk(systemTransferFunction); %transfer
function

figure;
step(Drone);
figure;
nyquist(Drone), grid;
figure;
bode(Drone), grid;
```

Передатна функція системи керування тангажем має вигляд:

$$T_{pitch}(s) = \frac{P \cdot (G1 + sG2 + G3 + G4) \cdot (1 + D)}{1 + P \cdot (G1 + sG2 + G3 + G4) \cdot \frac{1024}{s + 1024}}$$

Значення  $T_{pitch}(s)$  є передатною функцією системи керування тангажем БПЛА з використанням усіх обов'язково достатніх доступних параметрів.

Графік ступінчастої реакції системи керування тангажем наведений на рис. 24, діаграм Найквіста – на рис. 25, графік Боде - на рис. 26.

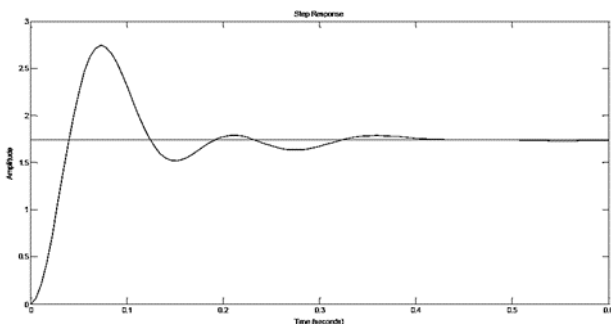


Рисунок 24. Ступінчаста реакція системи керування

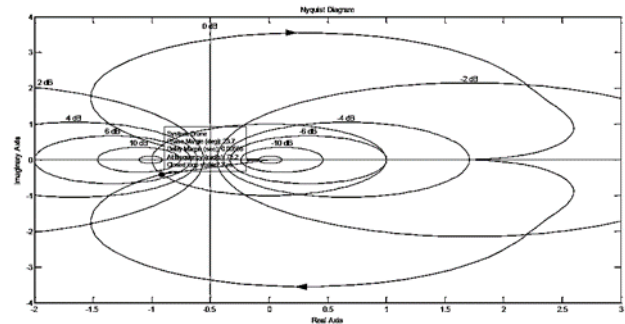


Рисунок 25. Схема Найквіста системи керування тангажем

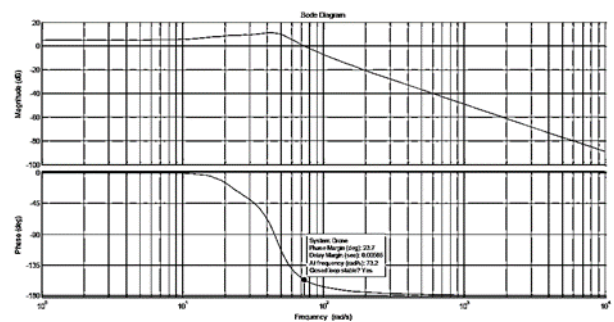


Рисунок 26. Графік Bode Plot системи керування тангажем

## V. ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження була розроблена реалізована та оцінена модульна структура, яка дозволяє операторам швидко зібрати без інструментів квадрокоптерний безпілотний літальний апарат (МР-БПЛА) із індивідуальними характеристиками польоту для виконання вимоги місії.

Фреймворк складається з п'яти модулів (контролер, трансмісія, відео, зв'язок і корисне навантаження), що дозволяє користувачеві комбінувати модулі та швидко зібрати МР-БПЛА, який найкраще відповідатиме вимогам бажаного застосування.

Для перевірки дизайну фреймворку було реалізовано та протестовано прототип з 3 модульних профілів МР-БПЛА, які тестувалися у двох режимах.

В роботі проведений поетапний процес вибору апаратних компонентів (датчиків, приводів, гвинта, двигунів, акумуляторів, електронних регуляторів швидкості) для модулів рамки для досягнення бажаних характеристик та перевірений алгоритм розрахунку часу польоту на основі даних безщіткового двигуна та гвинта, зібраних за допомогою тягового стенду/динамометра. Середня точність, досягнута для оцінки часу польоту

зависання за допомогою даного алгоритму, складає 98,94%.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Allenspach, M. Design and optimal control of a tiltrotor micro-aerial vehicle for efficient omnidirectional flight. / M. Allenspach, K. Bodie, M. Brunner, L. Rinsoz, Z. Taylor, M. Kamel, R. Siegwart, J. Nieto // *The International Journal of Robotics Research*. – 2020. № 39(10- 11). – pp. 1305–1325.
- [2] Anzai, T. Multilinked multirotor with internal communication system for multiple objects transportation based on form optimization method. / T. Anzai, M. Zhao, X. Chen, F. Shi, K. Kawasaki, K. Okada, M. Inaba // *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. – Vancouver, Canada. – 2017. – pp. 5977–5984.
- [3] Badr, S. A novel modification for a quadrotor design. / S. Badr, O. Mehrez, A. Kabeel // *Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems*. – Arlington, VA, USA, 2016. – pp. 702–710.
- [4] Barber, C. The quickhull algorithm for convex hulls. / C. Barber, D. Dobkin, H. Huhdanpaa // *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* – 1996. – №22(4). – pp. 469–483.
- [5] Blouin, C. Pitch control of an oblique active tilting bi-rotor. / C. Blouin, E. Lanteigne // *Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems*. – Orlando, FL, USA. – 2014. – pp. 791–799.
- [6] Bouabdallah, S. PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor. / S. Bouabdallah, A. Noth, R. Siegwart // *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. – Sendai, Japan. – 2004. – pp. 2451–2456.
- [7] Brescianini, D. Design, modeling and control of an omni-directional aerial vehicle. / D. Brescianini, R. D'Andrea // *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. – Stockholm, Sweden. – 2016. – pp. 3261–3266.
- [8] Bronz, M. Development of a fixed-wing mini UAV with transitioning flight capability. / M. Bronz, E. Smeur, H. Garcia de Marina, G. Hattenberger // *35th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. – 2017. – 3739.
- [9] De Martini, D. Design and modeling of a quadcopter with double axis tilting rotors. // D. De Martini, G. Gramazio, A. Bertini, C. Rottenbacher, T. Facchinetti. // *Unmanned Systems*. – 2017. – №5(03). – pp. 169–180.
- [10] Devlin, T. Elbowquad: Thrust vectoring quadcopter. / T. Devlin, R. Dickerhoff, K. Durney, A. Forrest, P. Pansodtee, A. Adabi, M. Teodorescu // *AIAA Information Systems-AIAA Infotech@Aerospace*. – 2018. – p. 0893.
- [11] Haus, T. A concept of a non-tilting multirotor-UAV based on moving mass control. / T. Haus, M. Orsag, S. Bogdan // *Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems*. – Miami, FL, USA. – 2017. – pp. 1618–1624.
- [12] Donadel, R. Modeling and control of a tiltrotor UAV for path tracking. / R. Donadel, G. Raffo, L. Becker // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2014. №47(3). – pp. 3839–3844.
- [13] Franchi, A. Full-pose tracking control for aerial robotic systems with laterally-bounded input force. / A. Franchi, R. Carli, D. Bicego, M. Ryll // *IEEE Trans. on Robotics*. – 2018. №34(2). – pp. 534–541.
- [14] Fu, Z. Modeling and control of a new multicopter. / Z. Fu, B.X.J. Yang, C. Wu, Y. Wei // *36th Chinese Control Conference (CCC)*. – Liaoning, China. – 2017. – pp. 6495–6500.
- [15] Akopov, M. Choosing a Camera for 3D Mapping. / M. Akopov, S. Maksymova, V. Yevsieiev. // *Journal of Universal Science Research*. – 2023. – №1(11). – pp. 28–38.
- [16] Hamandi, M. Omnipus-seven (O7+): An omnidirectional aerial prototype with a minimal number of unidirectional thrusters. / M. Hamandi, K. Sawant, M. Tognon, A. Franchi // *Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems*. – 2020. – pp. 754–761.
- [17] Малий, О. Методологічні засади вибору компонентів рушійної установки мультироторних БПЛА / О. Малий, Н. Фурманова, В. Онищенко, С. Малий // *Виробництво & Мехатронні Системи*. – 2023. – с. 158–162.
- [18] Jiang, G. Estimation and optimization of fully-actuated multirotor platform with nonparallel actuation mechanism. / G. Jiang, R. Voyles, K. Sebesta, H. Greiner. // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. – 2017. – pp. 6843–6848.

## METHOD OF PRE-PROJECT SELECTION OF COMPONENTS FOR FPV UAVS THE QUADROPTER TYPE ACCORDING TO THE SET VALUES OF THRUST, SPEED AND FLIGHT TIME

MALYI O. YU.

Ph.D, Associate professor, acting head of information technologies of electronic devices department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: docsasha2@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8457-8154;

POSPEIEVA I.YE.

Senior lecturer of information technologies of electronic devices department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail:

iris191259@gmail.com, ORCID: 0009-0004-7100-9245;

ФУРМАНОВА  
Н.І.

Ph.D, Associate professor, dean of faculty of information security and electronic communications of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nfurmanova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8670-2948;

ONYSHCHENKO  
V.F.

Ph.D, Associate professor of information technologies of electronic devices department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vfonish@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4213-7131;

ZALUZHNYI  
M.YU.

Senior lecturer of electric drive and commercial plant automation department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: myz.nuzp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1254-7498

IVANOV V.V.

master student of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kvet151.9@gmail.com, ORCID: 0009-0005-9445-4437.

**Purpose.** Develop a methodology for the pre-project selection of quadcopter-type UAV components for the creation of drones based on the specified criteria.

**Methodology.** Mathematical analysis and modeling.

**Findings.** The paper presents a comprehensive framework aimed at facilitating the rapid assembly of customizable multirotor unmanned aerial vehicles (MR-UAVs) tailored to specific mission requirements, all without the need for tools. This modular approach encompasses the development, implementation, and evaluation of a structured process that guides operators through selecting hardware components such as sensors, actuators, propellers, motors, batteries, and electronic speed controllers. This meticulous selection process is pivotal in achieving the desired flight characteristics of the MR-UAV. Furthermore, a software tool has been devised to streamline the equipment selection process and accurately compute flight time. The flight time calculation algorithm, rooted in data obtained from brushless motor and propeller analyses conducted using a traction stand/dynamometer, has undergone rigorous testing to ensure reliability and precision. The framework itself comprises five distinct modules: controller, transmission, video, communication, and payload. These modular components afford users the flexibility to mix and match according to the demands of their specific application, enabling the swift assembly of an MR-UAV optimized for the task at hand. To validate the efficacy of the framework, a prototype was constructed and subjected to rigorous testing, confirming the soundness of the design. Notably, the versatility of this framework is exemplified through the creation of three distinct modular MR-UAV profiles. These profiles cater to diverse applications: surveillance, emphasizing extended flight time; delivery, prioritizing larger payload capacity; and a hybrid configuration allowing seamless transition between battery power sources mid-flight. In essence, this paper not only introduces a modular framework for MR-UAV assembly but also underscores its practicality and adaptability through real-world implementation and testing across varied mission profiles.

**Originality.** For this section of the abstract should determining the most important results that reflect originality of work. The algorithm proposed in the article is based on an approach that allows adapting MR-UAVs at a higher level than previous systems. The infrastructure allows the user to configure flight characteristics (flight time, speed, maximum payload), as well as sensors and communication channels (video and data link) according to the requirements of a specific operation.

**Practical value.** To facilitate the process of selecting hardware components for frame modules, the paper presents an algorithm for estimating flight time, which is included in the process of building modular profiles. The algorithm has been tested and an average accuracy of 98.94% has been achieved for hover time-of-flight estimation. The design of the software is presented. This tool allows developers to analyze brushless motor and propeller data (obtained from the thrust stand), evaluate how gross weight and battery selection affect the MR-UAV (in terms of flight time, thrust-to-weight ratio, and maximum payload), and optimizes the process development of MR-UAV.

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle; components; automated design; flight controller; engine; electronic speed controller.*

## REFERENCES

- [1] Allenspach, M., Bodie, K., Brunner, M., Rinsoz, L., Taylor, Z., Kamel, M., ... & Nieto, J. (2020). Design and optimal control of a tiltrotor micro-aerial vehicle for efficient omnidirectional flight. *The International Journal of Robotics Research*, 39(10-11), 1305-1325.
- [2] Anzai, T., Zhao, M., Chen, X., Shi, F., Kawasaki, K., Okada, K., & Inaba, M. (2017, September). Multilinked multirotor with internal communication system for multiple objects transportation based on form optimization method. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 5977-5984.
- [3] Badr, S., Mehrez, O., & Kabeel, A. E. (2016, June). A novel modification for a quadrotor design. In *2016*



- International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 702-710.
- [4] Barber, C. B., Dobkin, D. P., & Huhdanpaa, H. (1996). The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 22(4), 469-483.
- [5] Blouin, C., & Lanteigne, E. (2014, May). Pitch control of an oblique active tilting bi-rotor. In *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 791-799.
- [6] Bouabdallah, S., Noth, A., and Siegwart, R. (2004) PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor. In: *2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Sendai, Japan*, 2451–2456.
- [7] Brescianini, D., & D'Andrea, R. (2016, May). Design, modeling and control of an omni-directional aerial vehicle. In *2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, 3261-3266.
- [8] Bronz, M., Smeur, E. J., Garcia de Marina, H., & Hattenberger, G. (2017). Development of a fixed-wing mini UAV with transitioning flight capability. In *35th AIAA applied aerodynamics conference*, 3739.
- [9] De Martini, D., Gramazio, G. V., Bertini, A., Rottenbacher, C., & Facchinetti, T. (2017). Design and modeling of a quadcopter with double axis tilting rotors. *Unmanned Systems*, 5(03), 169-180.
- [10] Devlin, T., Dickerhoff, R., Durney, K., Forrest, A., Pansodtee, P., Adabi, A., & Teodorescu, M. (2018). Elbowquad: Thrust vectoring quadcopter. In *2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@Aerospace*, 0893.
- [11] Haus, T., Orsag, M., & Bogdan, S. (2017, June). A concept of a non-tilting multirotor-UAV based on moving mass control. In *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1618-1624.
- [12] Donadel, R., Raffo, G. V., & Becker, L. B. (2014). Modeling and control of a tiltrotor UAV for path tracking. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 3839-3844.
- [13] Franchi, A., Carli, R., Bicego, D., & Ryll, M. (2018). Full-pose tracking control for aerial robotic systems with laterally bounded input force. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(2), 534-541.
- [14] Fu, Z., Xiao, B., Yang, J., Wu, C., & Wei, Y. (2017, July). Modeling and control of a new multicopter. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 6495-6500.
- [15] Akopov, M., Maksymova, S., & Yevsieiev, V. (2023). Choosing a Camera for 3D Mapping. *Journal of Universal Science Research*, 1(11), 28-38.
- [16] Hamandi, M., Sawant, K., Tognon, M., & Franchi, A. (2020, September). Omni-plus-seven (O7+): An omnidirectional aerial prototype with a minimal number of unidirectional thrusters. In *2020 International conference on unmanned aircraft systems (ICUAS)*, 754-761.
- [17] Malyi, O., Furmanova, N., Onyshhenko, V., Malyi S. Metodologichni zasady vyboru komponentiv rushijnoi' ustanovky multyrotornyh BPLA (2023). *Vyrobnyctvo & Mehatronni Systemy*, 158-162
- [18] Jiang, G., Voyles, R., Sebesta, K., & Greiner, H. (2017, September). Estimation and optimization of fully-actuated multirotor platform with nonparallel actuation mechanism. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 6843-6848.

УДК 004.03

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ АНОМАЛЬНОЇ ПОВЕДІНКИ ПРОЦЕСУ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

СІДАНЧЕНКО В.В. аспірант кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: vladmazur49@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5581-9177

**Мета роботи.** Розробка та дослідження методу контролю доменного процесу за відсутності можливості аналітичного опису його поведінки, котрий дозволяє виявляти аномалії виробничого процесу.

**Методи дослідження.** У цій роботі використані методи оцінки та прогнозу часових рядів на базі алгоритму фільтра Калмана, фрактального аналізу та нелінійної динаміки.

**Отримані результати.** Розроблено метод, що дозволяє виконувати оцінку та прогноз нестационарних стохастичних процесів з невідомою аналітичною моделлю, котрий включає вбудовану процедуру виявлення аномалій, засновану на методі 3 сигм. Виконано дослідження реальних часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі. Показано, що розроблений метод дозволяє ефективно виявляти аномалії у поведінці процесу. Розглянуто можливий варіант реалізації системи управління, що використовує запропонований метод.

**Наукова новизна.** Вперше розроблено модифікацію субоптимального фільтра-прогнозатора калманівського типу, інваріантного до властивостей оброблюваного процесу, що дозволяє підвищити достовірність і точність прогнозу нестационарних процесів при неможливості отримання їх аналітичної моделі та виявляти аномалії виробничого процесу за допомогою вбудованої процедури, яка ґрунтується на використанні методу 3 сигм. Вперше проведено дослідження часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі з використанням методу 3 сигм, яке дозволило виявити зони з аномально високими значеннями та викидами, які можуть свідчити про значні відхилення у поведінці виробничого процесу.

**Практична цінність.** Дане дослідження розширює існуючі методи контролю якості у металургійній промисловості та демонструє ефективність застосування статистичного методу 3 сигм для моніторингу та аналізу часових рядів в умовах реального виробництва. Отримані результати можуть бути використані для розробки більш точних систем управління якістю продукції та вжиття оперативних коригуючих заходів.

**Ключові слова:** часові ряди; метод 3 сигм; фільтр Калмана; доменна піч; прогноз; аналіз.

### I. ВСТУП

Хід доменного процесу можна контролювати на підставі даних про хімічний аналіз чавуну на випуску доменної печі, що являють собою часовий ряд значень процентного вмісту в чавуні таких хімічних елементів, як кремній, фосфор, сірка та ін.

Хімічний склад чавуну на випуску доменної печі є одним із ключових параметрів, що впливають на якість кінцевої продукції. Точні та своєчасні дані про хімічний склад дозволяють контролювати виробничий процес, виявляти відхилення та за потреби впроваджувати коригуючі заходи. У цій роботі проведено дослідження часових рядів даних про хімічний склад чавуну з використанням модифікованої процедури калманівської фільтрації та прогнозу, доповненої методом контролю за правилом 3 сигм.

Метод 3 сигм, що широко використовується в статистичному контролі якості, дозволяє ефективно виявляти аномалії та викиди в даних. Цей метод заснований на встановленні контрольних меж на рівні середнього значення, збільшеного або зменшеного на

три стандартні відхилення. Значення, що виходять за ці межі, розглядаються як аномальні та потребують подальшого аналізу. Застосування методу 3 сигм до аналізу часових рядів дозволяє не тільки виявляти значні відхилення даних, а й своєчасно реагувати на зміни у виробничому процесі.

### II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

До недавнього часу вважалося, що часові ряди які описують результати хімічного аналізу чавуну на випуску доменної печі, відповідають гауссівському розподілу [1].

В рамках дослідження [2], автором даної роботи було спростовано гіпотезу про гауссівські (нормальні) властивості даних про хімічний склад чавуну на випуску. Згодом, автором було опубліковано результати дослідження стохастичних властивостей досліджуваних часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску, методами нелінійної динаміки та детермінованого хаосу, які однозначно підтвердили раніше висунуту гіпотезу про фрактальний характер досліджуваних часових рядів [3]. Разом з тим, виникла потреба у впровадженні алгоритмів контролю та прогнозування значень

хімічного складу чавуну (з метою виявлення аномалій та формування оптимальних керуючих впливів на хід процесу) з урахуванням їх фрактальних властивостей, оскільки, традиційні методи прогнозу виявились неадекватними відповідно до характеру досліджуваного процесу [4]-[5].

Раніше, автором даної роботи (у співавторстві) було запропоновано модифікований алгоритм фільтрації та прогнозу часових рядів на базі фільтра Калмана [6]. Цей метод є розширенням класичного фільтра Калмана. У контексті доменного виробництва модифікований фільтр Калмана може застосовуватися для прогнозування хімічного складу чавуну та контролю аномальних явищ доменного процесу. З цією метою нами пропонується доповнити модифіковану процедуру калманівської фільтрації та прогнозу методом контролю аномалій за правилом 3 сигм. Таким чином, впровадження запропонованого модифікованого алгоритму є актуальним, оскільки дозволить оптимізувати процеси змішування сировини та управління тепловою роботою горна доменної печі, забезпечуючи мінімізацію втрат і покращення якості кінцевого продукту.

### III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є розробка та дослідження методу контролю доменного процесу за відсутності можливості аналітичного опису його поведінки, котрий дозволяє виявляти аномалії виробничого процесу.

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

Контроль та прогнозування хімічного складу чавуну на випуску доменної печі є критично важливими завданнями для забезпечення високої якості кінцевої продукції та оптимізації виробничих процесів. Точне визначення вмісту ключових елементів у чавуні, таких як кремній, марганець, фосфор та сірка, дозволяє не лише підтримувати стабільну якість кінцевого продукту доменної плавки, але й запобігати можливим дефектам та збоєм у подальших етапах металургійного виробництва.

Сучасні засоби контролю та прогнозування хімічного складу часто стикаються з низкою обмежень та проблем. Традиційні методи аналізу, такі як лабораторні дослідження проб, хоч і мають високу точність, часто не дозволяють забезпечити оперативний моніторинг у реальному часі. Це призводить до затримок отримання даних і знижує ефективність виробничого процесу.

Автоматизовані системи контролю, незважаючи на їх прогресивність, можуть страждати від проблем калібрування, технічних збоїв та обмеженої точності в умовах змінних параметрів роботи доменної печі.

Крім того, існуючі методи прогнозування хімічного складу чавуну часто не враховують всіх

можливих факторів, що впливають на процес плавки, таких як зміна сировина, коливання температурних режимів і динаміку хімічних реакцій в доменній печі. Це призводить до недостатньої точності прогнозів та збільшує ризик виникнення аномалій та викидів у даних про хімічний склад чавуну.

Як зазначалося вище, в рамках дослідження перелічених проблем, автором було запропоновано модифікований алгоритм на базі калманівської фільтрації який є інваріантний до властивостей оброблюваного процесу, що дозволяє підвищити достовірність і точність прогнозу нестационарних процесів при неможливості отримання їх аналітичної моделі, а також реалізовувати прогноз хімічного складу чавуну в реальному часі на основі раніше отриманих даних з мінімальними відносними помилками [6].

Аналіз наявних автоматизованих систем управління доменним процесом підтверджує різноманітність функцій, технічних можливостей та інформаційних ресурсів, а також ієрархічну структуру цих систем. Огляд фахових публікацій вказує на те, що найвищий рівень автоматизації може бути досягнутий за умови використання автоматизованих систем, які поєднують математичні моделі, базу знань та реально-часові показники плавки.

Запропонований модифікований алгоритм на базі калманівської фільтрації представляє собою потужний засіб оцінки та прогнозування. У контексті основного завдання, а саме покращення точності та достовірності прогнозних даних, цей алгоритм має бути впроваджений у систему управління доменною піччю. На даному етапі важливо проаналізувати фактори, які впливають на зміни хімічного складу під час плавки. Це дозволить з більшою достовірністю визначити необхідний вплив на процес доменної плавки.

Основні фактори, що впливають на склад чавуну, включають витрату коксу та залізородних матеріалів, параметри комбінованого дуття, властивості шлаку тощо. Важливо також враховувати вплив теплового режиму горна, оскільки він має вирішальне значення для структури чавуну [7], [8].

Формування структури чавуну відбувається при затвердінні виливки. Основними факторами, що впливають на структуроутворення чавуну, є його хімічний склад та швидкість охолодження виливки у формі.

Кремній Si сприяє графітизації чавуну та покращує його ливарні властивості. У сірих чавунах міститься 0,8...4,5% Si.

Фосфор P підвищує текучість чавуну, тому допустимий його вміст до 0,4%, але у відповідних чавунних виливках міститься фосфору менше 0,15%, так як зі зростанням вмісту фосфору збільшується крихкість чавуну.

Сірка S ускладнює графітизацію, збільшує крихкість і погіршує текучість чавуну, тому сірки в чавунах повинно бути не більше 0,1%.

Відхилення у складі хоча б одного із хімічних елементів чавуну, може призвести до виробничого браку, і як результат, до погіршення економічних показників виробництва.

Для управління таким складним технологічним агрегатом як доменна піч майстер повинен мати у своєму розпорядженні підсистеми вимірювань, оцінювання, зберігання, обробки інформації, а також інтелектуальні системи управління, включаючи блоки прогнозування, які дозволять йому приймати

адекватні рішення щодо внесення коректив у технологічні процеси відповідно до вимог регламенту [9]-[10].

Дослідження стохастичних властивостей даних про хімічний склад чавуну на випуску, підтвердили їх фрактальний характер [11].

У нелінійних динамічних системах дуже важливою є візуальна оцінка. Як видно з рисунку 1 який ілюструє динаміку вмісту кремнію у чавуні, мають місце ділянки де процентне значення кремнію перевищує необхідні межі 0,8...4,5%.

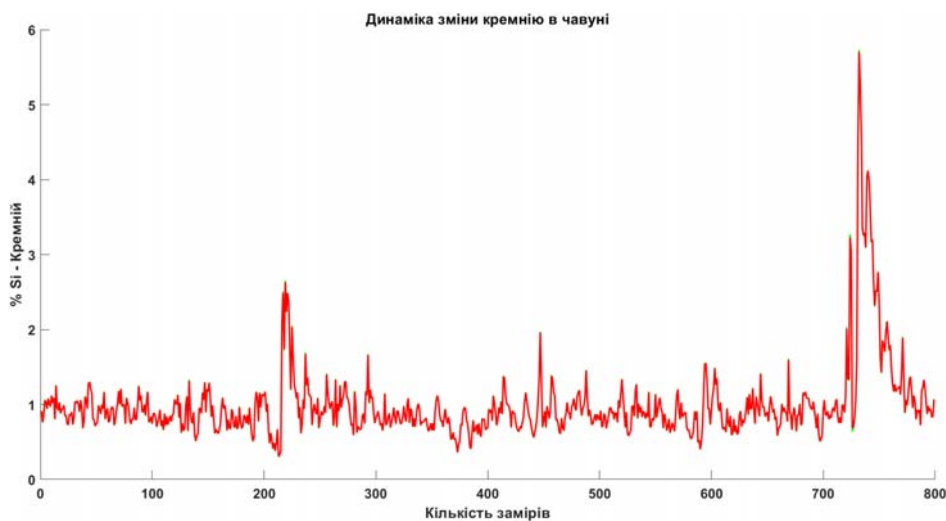


Рисунок 1. Динаміка вмісту кремнію

Виникає необхідність дослідження часових рядів даних про вміст основних хімічних елементів чавуну на випуску на предмет аномалій які можуть сприяти погіршенню технологічного процесу і як результат, збільшенню виробничого браку.

Для вирішення поставленої задачі було запропоновано застосувати метод 3 сигм.

Метод 3 сигм є статистичним методом, що використовується для виявлення аномалій даних часових рядів. У контексті аналізу часових рядів цей метод дозволяє виявляти значення, які значно відхиляються від очікуваного діапазону, що базується на характеристиках розподілу даних [12]-[13]. Даний метод часто використовується в теорії нормального розподілу, де більшість даних (приблизно 99.7%) перебувають у межах трьох стандартних відхилень (сигм) від середнього значення.

У цій роботі ми застосуємо цей метод, інтегруючи його з модифікованою процедурою калманівської фільтрації, яка полягає у наступному.

Відомо, що рівняння фільтра Калмана можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{X}_n &= F_n \hat{X}_{n-1} + K_n [S_n - H_n F_n X_{n-1}] \\ K_n &= A_n H_n^T [H_n A_n H_n^T + R]^{-1} \\ A_n &= F_n P_{n-1} F_n^T \\ P_n &= A_n - K_n H_n A_n; \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\hat{X}_n$  – оціночний вектор стану;  $F_n$  – матриця переходу зі стану  $n - 1$  у  $n$ ;  $K_n$  – коефіцієнт підсилення фільтра Калмана;  $S_n$  – виміряне значення сигналу;  $P_n$  – матриця помилок;  $H_n$  – матриця умов вимірювання;  $R$  – дисперсія шуму процесу. Індекс «Т» означає транспонування матриці.

Рівняння (1) може застосовуватися для отримання оцінок напрямку, якщо матриця переходу  $F_n$  відома, що по суті є аналітичним видом оброблюваної залежності.

У нашому випадку аналітичний вид функції, а отже, значення матриці  $F_n$  невідомі. Тому доцільно виконати апроксимацію  $F_n$  у кожній точці, рядом Тейлора  $n -$  го порядку.

За результатами виконання процедури апроксимації матриця переходу матиме вигляд:

$$F_n = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \alpha_n \\ 0 & 1 & 2 & \beta_n \\ 0 & 0 & 1 & \gamma_n \\ -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Знаючи матрицю переходу, можна побудувати модифікований алгоритм фільтра Калмана:

$$\begin{cases} \hat{x}_n = \hat{x}_{n-1} + \hat{y}_{n-1} + \hat{z}_{n-1} + \alpha_n C_n \\ \hat{y}_n = \hat{y}_{n-1} + 2\hat{z}_{n-1} + \beta_n C_n \\ \hat{z}_n = \hat{z}_{n-1} + \gamma_n C_n \\ C_n = S_n - \hat{x}_{n-1} - \hat{y}_{n-1} - \hat{z}_{n-1} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ ,  $\gamma_n$  - компоненти вектора коефіцієнта посилення.

Для реалізації процедури прогнозу достатньо в (1) ввести  $H_n = [100]$ , а індекс  $n$  представити як  $n = n + k$ , де  $k$  - кількість заздалегідь встановлених кроків прогнозу.

З метою виявлення аномалій доповнимо процедуру фільтрації та прогнозу методом 3 сигм який полягає в наступному.

Ми пропонуємо процедуру обчислення статистики такого вигляду:

$$B_M = \sum_l^M b_l, B_0 = 0, l = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

$$b_l = \text{sign}\{S_l - \hat{X}_l\} = \begin{cases} +1, S_l - \hat{X}_l \geq 0 \\ -1, S_l - \hat{X}_l < 0 \end{cases} \quad (4)$$

на інтервалі  $(n - M, n)$ . Визначені на цьому інтервалі величини  $(B_M - \min B_M)$  та  $(\max B_M - B_M)$  порівнюються з порогом  $h = 3\sigma$ . У разі перевищення значення  $h$  однієї з величини приймається рішення про виявлення аномалії, параметрам фільтра присвоюється початкове значення, а фільтрація продовжується з моменту.

Ось основні етапи застосування методу:

1. Оцінка поточного значення  $\hat{x}_n$  (на підставі рівняння (2)) та середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  (стандартним методом).

2. Обчислення статистики  $B_M$  з виразу (3) з урахуванням (4).

3. Обчислення значень контрольних меж

$(B_M - \min B_M)$  та  $(\max B_M - B_M)$ .

4. Порівняння значень контрольних меж із порогом  $h = 3\sigma$ . У разі перевищення значення  $h$  однієї з величини контрольних меж приймається рішення про виявлення аномалії.

5. Сигналізація про появу аномалії.

6. Повернення до процесу оцінки, прогнозу та виявлення аномалії.

Кожне значення часового ряду перевіряється на предмет того, чи потрапляє воно в діапазон між верхньою контрольною межею та нижньою контрольною межею. Значення, що виходять за ці межі, вважаються аномальними [14].

Для проведення дослідження використовувалися часові ряди, які представляють відсотковий вміст основних хімічних елементів чавуну на випуску доменної печі, отримані в різні часові періоди на доменній печі №3 (ДП-3) Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча (ММК). Час кожної плавки становить близько 2 годин. Кожна точка відповідає одній плавці. Для побудови прогнозу було використано 800 точок (значень відсоткового вмісту кожного хімічного елемента), отриманих після кожної плавки [15].

На рисунку 2 представлені графіки які ілюструють роботу запропонованого модифікованого алгоритму прогнозу значень часових рядів на базі фільтра Калмана із вбудованою функцією виявлення аномалій із застосуванням функції 3 сигм. Де рис. 2а - прогноз та оцінка значень хімічного складу кремнію Si; рис. 2б - прогноз та оцінка значень хімічного складу сірки S; рис. 2в - прогноз та оцінка значень хімічного складу фосфору P.

На графіках зеленим кольором відображені початкові значення хімічних елементів чавуну, червоним кольором відображені прогнозні значення отримані за допомогою запропонованого алгоритму, точки рожевого кольору вказують на значення які перевищують межу 3 сигм.

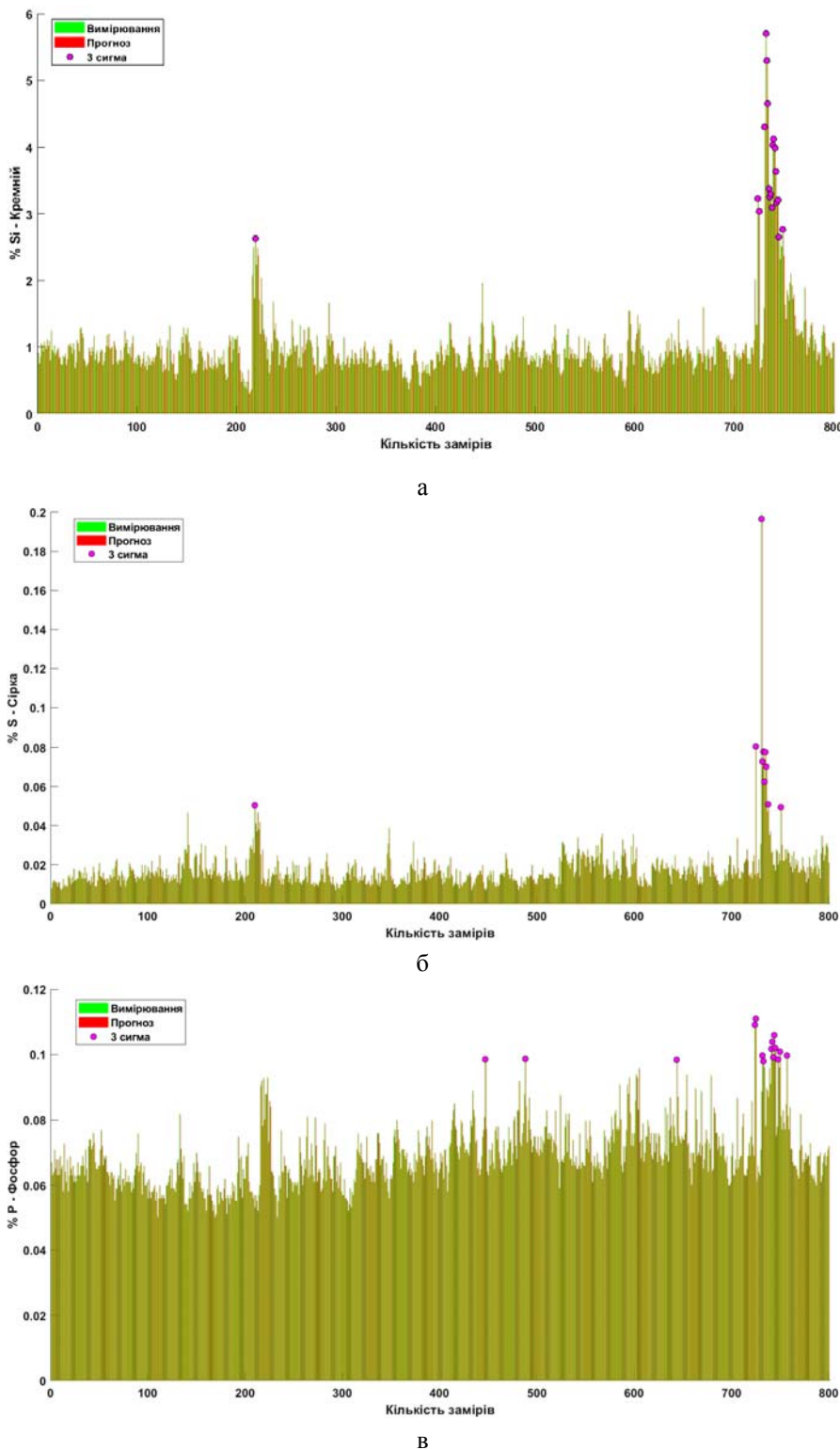


Рисунок 2. Результати роботи алгоритму з функцією виявлення аномалій

Як видно з отриманих графіків прогнозу основних елементів хімічного складу чавуну, мають місце точки, що значно перевищують поріг 3 сигм, що сигналізує про значні відхилення, які вимагають уважного аналізу оператором доменного цеху. Це

може бути пов'язане із процесуальними, технічними чи якісними аспектами виробництва. Важливо використовувати ці дані для виявлення причин відхилень та вжиття заходів щодо корекції процесу, щоб забезпечити стабільність та високу якість чавуну на випуску.

Розглянемо приклад можливої інтеграції запропонованої реалізації модифікованого фільтра Калмана до системи управління тепловим режимом доменної печі (рис. 3), впровадженій на доменній печі № 9 металургійного комбінату «Криворіжсталь». На цей час серед функціонуючих на доменних печах по всьому світу систем контролю й управління лише деякі мають функцію оперативного впливу на процес доменної плавки.

Ці недоліки здебільшого пов'язані з некоректним підходом до аналізу даних про хімічний склад чавуну на випуску протягом багатьох десятиліть і, як наслідок, із використанням прогнозованих моделей, неадекватних характеру прогнозованого процесу.

Зважаючи на пріоритети впровадження на доменних комплексах України сучасних систем управління доменним процесом, насамперед потрібно підвищувати інформаційний рівень систем центрального контролю, доповнивши їх блоками прогнозування контрольованих параметрів. Різностороннє опрацювання інформації дасть змогу значно підвищити ефективність використання засобів контролю [16].

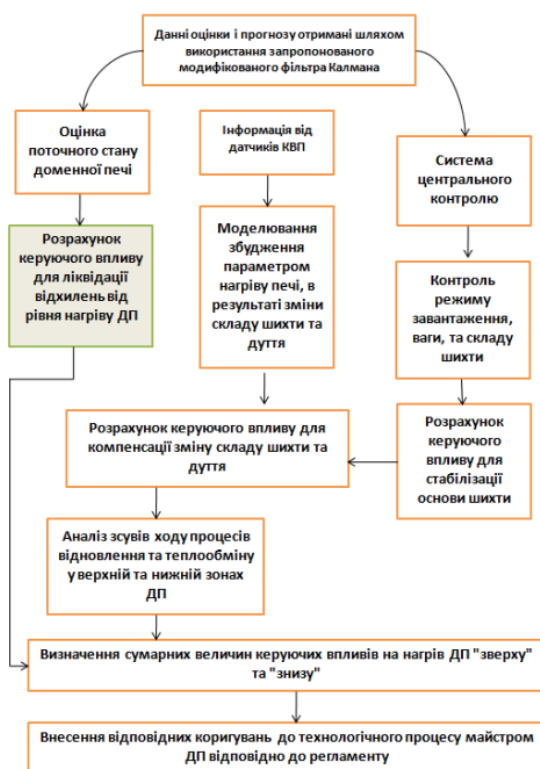


Рисунок 3. Приклад можливої реалізації системи управління з урахуванням застосування впливу на режим доменної плавки

## V. ВИСНОВКИ

З огляду на отримані результати дослідження, можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено метод, що дозволяє виконувати оцінку та прогноз нестаціонарних стохастичних процесів з невідомою аналітичною моделлю, котрий включає вбудовану процедуру виявлення аномалій, засновану на методі 3 сигм.

Перевищення порога 3 сигм може свідчити про порушення у виробничому процесі. Наприклад, це може бути результатом нестабільного подачі сировини, змінами параметрів доменної печі (температура, тиск, швидкість подачі дуття і т.д.), або технічними збоями.

2. Виконано дослідження реальних часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі. Показано, що розроблений метод дозволяє ефективно виявляти аномалії у поведінці нестаціонарного процесу.

Це може призводити до непередбачуваних змін у кінцевому хімічному складі чавуну.

3. Запропоновано можливий варіант практичної реалізації системи управління, що використовує розроблений метод.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Biswas S., Monroe C., Prucha T. Use of published experimental results to validate approaches to gray and ductile iron mechanical properties prediction // International Journal of Metalcasting. - 2017. - 11: 656-674.
- [2] Сіданченко В. В. Перевірка характеру розподілу даних про хімічний склад чавуну на випуску // Information technology: computer science, software engineering and cyber security. - 2023. - № 3. - С. 65-69. DOI: doi.org/10.32782/IT/2023-3-8
- [3] Сіданченко В.В., Нікольська О.І. Методи нелінійної динаміки в задачі прогнозування хімічного складу чавуну на випуску // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. - 2023, 2: 76-83. DOI: doi.org/10.32782/IT/2023-2-9
- [4] Гуліна І. Г. Адаптивна САУ складним багатозв'язним об'єктом управління з інтелектуальним прогнозуванням // Системи обробки інформації. - 2011. - № 87. - С. 57-62. - ISSN 16817710
- [5] Cameron I. Blast furnace ironmaking: Analysis, control, and optimization. - Elsevier, 2019.
- [6] Сіданченко В. В., Гусев О. Ю., Нікольська О. І. Експериментальне дослідження ефективності модифікованої процедури прогнозу фрактальних процесів за Калманом // Електротехнічні та інформаційні системи. - 2024. - № 105. - С. 3-9. DOI: doi.org/10.32782/EIS/2024-105-1

- [7] Невкіпіла М. В. Дослідження джерел вхідної інформації і розробка структури та основних технічних параметрів засобу відображення інформації в АСК ТП доменної печі // Математичне моделювання. - 2015. - № 1. - С. 36-38.
- [8] Жигуц Ю. Ю., Лазар В. Ф., Теличко В. Ф. Технологія отримання термітних кременистих чавунів // НАУКОВИЙ ВІСНИК. - 2011. - №11.
- [9] Крячко, Г. Ю., Сігарьов Є. М. Оцінка змін продуктивності і обмежень у форсуванні ходу при збільшенні об'єму доменних печей // Метал та лиття України. - 2023. DOI: doi.org/10.15407/steelcast2023.02.008
- [10] Большаков, В. И., Тубольцев Л. Г. Проблемы і роль наукових досліджень у розвитку металургії України // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. - 2011.
- [11] Гусев О. Ю., Сіданченко В. В. Фрактальний аналіз реальних даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. - 2022. - № 2. - С. 24-31. DOI: doi.org/10.32782/IT/2022-2-3
- [12] Loucks D. P. Developing and implementing decision support systems: a critique and a challenge 1 // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. - 1995. - 31.4: 571-582.
- [13] Shpak N. The application of tools for assessing the financial security of enterprises. In: *Forum Scientiae Oeconomia*. 2022. p. 29-44.
- [14] Олішевський І.Г. Автоматизована методика розрахунку параметрів для нетрадиційних технологій опалення та кондиціонування будівель/ І.Г. Олішевський, Г.С. Олішевський // Електротехніка та електроенергетика. / Запорізький нац. ун-т «Запорізька політехніка». – Запоріжжя, 2021. – № 3. – С. 40-47. DOI: doi.org/10.15588/1607-6761-2021-3-4
- [15] Kornienko V.I., Gerasina A.V., Gusev A.Yu. Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production. *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems*, Taylor & Francis Group, London, 2013, p.p. 183-192. DOI: doi.org/10.1201/b16355
- [16] Гончар О. В. Забезпечення якості даних обстеження капітальних інвестицій на етапі поширення результатів вибіркового обстеження // Інвестиції: практика та досвід. - 2012. - № 12. - С. 4-10.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2024

## DEVELOPMENT AND STUDY OF A METHOD FOR CONTROLLING ANOMALOUS BEHAVIOR IN THE BLAST FURNACE PROCESS

SIDANCHENKO  
V.V.

PhD student at the Department of Information Security and Telecommunications, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine, e-mail: vladmazur49@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5581-9177

**Purpose.** To develop and investigate a method for controlling the blast furnace process in the absence of an analytical description of its behavior, which allows for the detection of anomalies in the production process.

**Methodology.** This study utilizes methods for evaluating and forecasting time series based on the Kalman filter algorithm, fractal analysis, and nonlinear dynamics.

**Findings.** A method has been developed that allows for the evaluation and forecasting of non-stationary stochastic processes with an unknown analytical model. This method includes an embedded anomaly detection procedure based on the 3-sigma method. Research was conducted on real-time series data of the chemical composition of cast iron at the blast furnace output. It has been demonstrated that the developed method effectively detects anomalies in the process behavior. A possible implementation of a control system using the proposed method has been considered.

**Originality.** For the first time, a modification of the suboptimal Kalman-type filter-forecaster has been developed, invariant to the properties of the processed process. This modification improves the reliability and accuracy of forecasting non-stationary processes when it is impossible to obtain their analytical model and detects production process anomalies using an embedded procedure based on the 3-sigma method. For the first time, a study of time series data on the chemical composition of cast iron at the blast furnace output using the 3-sigma method has been conducted, which allowed for the identification of zones with anomalous values and outliers, indicating significant deviations in the production process behavior.

**Practical value.** This research expands existing quality control methods in the metallurgical industry and demonstrates the effectiveness of the statistical 3-sigma method for monitoring and analyzing time series in real production conditions. The obtained results can be used to develop more accurate quality control systems and take prompt corrective actions.

**Keywords:** Time series; 3-sigma method; Kalman filter; blast furnace; forecasting; analysis.



## REFERENCES

- [1] Biswas, S., Monroe, C., & Prucha, T. (2017). Use of published experimental results to validate approaches to gray and ductile iron mechanical properties prediction. *Inter. Metalcast*, 11 (4), 656–674.
- [2] Sidanchenko V.V. (2023). Perevirka kharakteru rozpodilu danykh pro khimichniy sklad chavunu na vypusku [Examination of the data distribution nature on the chemical composition of cast iron at the output] *Information technology: computer science, software engineering and cyber security*. № 3. 65-69. (in Ukrainian.) DOI: doi.org/10.32782/IT/2023-3-8
- [3] Sidanchenko, V., & Nikolska, O. (2023). Metody neliniinoi dynamiky v zadachi prohnozuvannia khimichnogo skladu chavunu na vypusku [Methods of non-linear dynamics in the problem of forecasting the chemical composition of cast iron at the output ]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 76-83. (in Ukrainian) DOI: doi.org/10.32782/IT/2023-2-9
- [4] Gulina I. (2011). Adaptivna SAU skladnym bahatozviazным obiekтом upravlinnia z intelektualnym prohnozuvanniam. *Systemy obrobky informatsii*, 87, 57-62. (in Ukrainian)
- [5] Cameron, I., Sukhram, M., Lefebvre, K., & Davenport, W. (2019). Blast furnace ironmaking: Analysis, control, and optimization. *Elsevier*.
- [6] Sidanchenko V., Gusev O., Nikolska O. (2023). Eksperymentalne doslidzhennia efektyvnosti modyfikovanoi protsedury prohnozu fraktalnykh protsesiv za kalmanom [The experimental investigation of the effectiveness of the modified procedure for forecasting fractal processes with Kalman]. *Elektrotekhnichni ta informatsiini systemy*, 105, 3-9. (in Ukrainian.) DOI: doi.org/10.32782/EIS/2024-105-1
- [7] Nevkypila, M. V. (2015). Doslidzhennia dzherel vkhidnoi informatsii i rozrobka struktury ta osnovnykh tekhnichnykh parametriv zasobu vidobrazhennia informatsii v ASK TP domennoi pechi. *Matematychni modeliuvannia*, (1), 36-38. (in Ukrainian)
- [8] Zhyhuts, Yu., Lazar, V., Telychko, V. (2011). Tekhnolohiia otrymannia termitnykh kremenystykh chavuniv. *Naukovyi visnyk*, 11, 5. (in Ukrainian)
- [9] Kriachko, H. Yu., & Siharov, Ye. M. (2023). Otsinka zmin produktyvnosti i obmezhen u forsuvanni khodu pry zbilshenni obiemu domennykh pechei. *Metal ta lyttia Ukrainy*, 31(2). (in Ukrainian) DOI: doi.org/10.15407/steelcast2023.02.008
- [10] Bolshakov, V. Y., & Tuboltsev, L. H. (2011). Problemy i rol naukovykh doslidzhen u rozvytku metallurhii Ukrainy. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii*.
- [11] Gusev, O., & Sidanchenko, V. (2022). Fraktalni analiz realnykh danykh pro khimichniy sklad chavunu na vypusku domennoi pechi [Fractal analysis of real data on the chemical composition of cast iron at the output of a blast furnace]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 24-31. (in Ukrainian) DOI: doi.org/10.32782/IT/2022-2-3
- [12] Loucks, D. P. (1995). Developing and implementing decision support systems: a critique and a challenge 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31(4), 571-582.
- [13] Shpak, N., Podolchak, N., Karkovska, V., Sroka, W., & Horbal, N. (2022, June). The application of tools for assessing the financial security of enterprises. In *Forum Scientiae Oeconomia* (Vol. 10, No. 2, pp. 29-44).
- [14] Olishevskiy, I., & Olishevskiy, H. (2021). Automated method of calculation of parameters for non-traditional heating technologies and conditioning of buildings. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (3), 40–47. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-3-4>
- [15] Kornienko, V. I., Gusev, A. Y., Gerasina, A. V., & Kornienko, V. I. (2013). Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production. *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems*, 183-192. DOI: doi.org/10.1201/b16355
- [16] Honchar, O. V. (2012). Zabezpechennia yakosti danykh obstezhennia kapitalnykh investytsii na etapi poshyrennia rezultativ vybirkovoho obstezhennia. *Investytsii: praktyka ta dosvid*, (12), 4-10. (in Ukrainian.)