

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"



Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№4'2023

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

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2023

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ
КОЛЕГІЇ

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

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

Журнал включено до міжнародних наукометричних баз, каталогів та систем пошуку: Index Copernicus, CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Resource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; Наукова періодика України – 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 13.02.2024 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №4 від 27.04.2024 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,86. Тираж 300 прим. Зам. №100.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№4'2023

Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2023

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

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

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

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

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

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

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

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

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on February 13, 2024 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.4 dated April 27, 2024). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,86. Number of copies printed 300. Rep. № 100.

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

- Сенченко С.О., Воробйов Б.В., Кириленко Я.О., Ліхно Я.В., Хань Л.*
Моделювання режимів буксування асинхронного електроприводу електромобіля.....7
- Kotsur I.M., Kotsur M.I., Yarimbash D.S., Duvchuk T.Ye., Bezverkhnia Yu. S., Ozerov V.S.*
Investigation of electromagnetic processes in the case of static eccentricity of a two-pole induction motor with a short-circuited rotor.....17
- Савенко О.С.*
До питання побудови зварювальних інверторних джерел з підвищеним коефіцієнтом потужності.....25

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

- Данильченко Д.О., Федорчук С.О., Потривай А.Е., Мінакова К.О., Петров С.О., Петрова Ю.В.*
Зелена енергетика як ключовий елемент впровадження концепції розподіленої генерації...32

III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Кунденко М.П., Мардзявко В.А., Руденко А.Ю.*
Використання критеріїв для оптимізації процесу маршрутизації елеваторного комплексу...44
- Дрешпак Н.С.*
Поновлення регресійної моделі для унормування питомих витрат енергії.....51

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

- Senchenko S.O., Vorobiov B.V., Kyrylenko Y.O., Likhno Y.V., Khan L.*
Slip modes modeling of electric vehicle asynchronous electric drive7
- Kotsur I.M., Kotsur M.I., Yarimbash D.S., Dychuk T.Ye., Bezverkhnia Yu. S., Ozerov V.S.*
Investigation of electromagnetic processes in the case of static eccentricity of a two-pole induction motor with a short-circuited rotor.....17
- Savenko O.S.*
To the question of construction of welding inverter sources with a high power factor.....25

II POWER ENGINEERING

- Danylchenko D.O., Fedorchuk S.O., Potryvay A.E., Minakova K.O., Petrov S.O., Petrova Y.V.*
Green energy as a key element of the implementation of the concept of distributed generation....32

III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

- Kundenko M.P., Mardziavko V.A., Rudenko A.Y.*
Use of criteria for process optimization elevator complex routing.....44
- Dreshpak N.S.*
Renewal of the regression model for normalization of specific energy consumption.....51

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ БУКСУВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

- СЕНЧЕНКО С.О. аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0486-2471;
- ВОРОБІЙОВ Б.В. д-р філософії (к.т.н.), завідувач кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0264-354X;
- КИРИЛЕНКО Я.О. асистент кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0331-617X;
- ЛІХНО Я.В. аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Yaroslav.Likhno@ieec.khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7082-7562;
- ХАНЬ Л. аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: seanhanzi@mail.com, ORCID: 0000-0001-8182-0040;

Мета роботи. Створення імітаційної моделі електроприводу електромобіля з можливістю моделювання в режимах ковзання, а також подальше визначення методу виявлення ковзання якомога раніше для подальшого зменшення або запобігання ковзанню.

Методи дослідження. Під час проведення дослідження використано метод еквівалентної потужності для вибору асинхронного двигуна. Використовуючи методи математичного моделювання в середовищі візуального програмування створено імітаційну модель електроприводу.

Отримані результати. Математичні моделі в структурній формі системи керування, силового перетворювача та двигуна додаються спрощено, як блоки. Для складання імітаційної моделі блоки системи керування та силового перетворювача будуть зібрані за моделями елементів силових електричних кіл. Модель дозволяє моделювати ЕП з величезною кількістю змінних параметрів – моделювати процеси буксування одним або двома колесами, різку зміну параметрів двигуна, вихід з ладу одного з компонентів силового ланцюга тощо. З використанням пакетів Simulink та SimPower програмного комплексу Matlab, а також структурної схеми електроприводу, була синтезована імітаційна модель ЕП. Комп'ютерне моделювання проводилося для двох режимів: початок руху електромобіля, коли одне з коліс з моменту запуску знаходилося на поверхню дороги зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) та розгін з наїздом на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) одним колесом у момент часу 6,3 с. Отримані діаграми повністю відповідають реальним фізичним процесам, що відбуваються в електромобілі і дають підстави вважати, що побудовані математичні та імітаційні моделі є адекватними. Виходячи з цього отримано та проаналізовано електромеханічні перехідні процеси в електроприводі під час розгону з пробуксовкою та наїзду одного колеса на дорожнє покриття зі зниженим зчепленням. В результаті цього аналізу визначено найбільш оптимальний і надійний спосіб визначення режиму заносу для його подальшого усунення.

Наукова новизна. Побудовано імітаційну модель асинхронного електроприводу електромобіля з детальною механічною частиною з урахуванням механічного диференціала. Отримана модель дозволяє моделювати процеси буксування одним або двома колесами, різку зміну параметрів двигуна, вихід з ладу одного з компонентів силового ланцюга тощо.

Практична цінність. На основі отриманих результатів сформульовано основні умови ковзання по відношенню до електромобіля. Відповідно до отриманих даних запропоновано алгоритм ідентифікації початку ковзного режиму.

Ключові слова: електропривод; електромобіль; пробуксовка шин; пробуксовка; асинхронний двигун; імітаційна модель; механічний диференціал.

I. ВСТУП

Згідно зі статистичними даними [1] - [2], сьогодні автомобіль є найнебезпечнішим видом транспорту. Більшість аварій відбувається через втрату керування, наприклад, під час дощу чи ожеледі. Причиною цього є пробуксовка – процес втрати зчеплення коліс з дорожнім покриттям і подальше їх пробуксовування. Необхідність підвищення безпеки водіння є першочерговою метою.

Тенденція до переходу від автомобілів з двигуном внутрішнього згорання до електромобілів (ЕМБ) актуальна як ніколи. Багато країн посилюють екологічні стандарти щодо забруднення повітря, щоб покращити навколишнє середовище [3] - [5], і тому існує потреба у підвищенні безпеки електромобілів. Це також пов'язано з поліпшеними пусковими характеристиками електродвигунів в порівнянні з двигунами внутрішнього згорання і, як наслідок, більш легким поломкою на буксування.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасний мікропроцесорний електропривод (ЕП) має швидкий час відгуку, що дає можливість використовувати ЕП електромобіля для запобігання пробуксовці та заносу шляхом раннього виявлення пробуксовки.

Для вирішення цієї проблеми необхідно досліджувати процеси, що відбуваються в електроприводі з урахуванням електромеханічних особливостей, особливостей механіки автомобіля, а також особливостей дорожнього покриття.

Механічна частина ЕП електромобіля включає механічний диференціал, тому можна досліджувати пробуксовку кількох ведучих коліс, а також одного. Ця обставина виділяє електропривод електромобіля серед інших тягових ЕП, вносячи свої особливості в процеси, що відбуваються. На даний момент відповідних досліджень з урахуванням особливостей ЕП та наявності диференціала в механічній частині немає, що дає підстави вважати цю роботу актуальною. У роботах [6] - [9] наведено деякі дослідження процесів буксування для автомобілів з двигуном внутрішнього згорання, однак вони не враховують особливості електроприводу.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є створення імітаційної моделі електроприводу електромобіля з можливістю моделювання в режимах ковзання, а також подальше визначення методу виявлення ковзання якомога раніше для подальшого зменшення або запобігання ковзанню.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Побудова математичної моделі ЕП враховує такі припущення:

- ведучі колеса передні;
- електромобіль має коробку передач;
- механічна частина ЕМБ має диференціал;
- ЕМБ рухається прямолінійно.

Сила тяги F_{tr} створюється крутним моментом електродвигуна T , що передається на піввісь коліс через коробку передач і диференціал з відповідними передавальними числами i_{GB} і i_d і загальним передавальним числом трансмісії.

$$i = i_{GB} \cdot i_d. \quad (1)$$

Завдяки диференціалу крутні моменти на осях T_1 і T_2 однакові і рівні.

$$T_1 = T_2 = \frac{i \cdot T \cdot \eta}{2}, \quad (2)$$

де η – ККД передачі,

T – момент двигуна.

Сила опору руху для електромобіля F_{res} створюється кількома складовими [10]:

$$F_{res} = F_{rol} + F_{gr} + F_a, \quad (3)$$

де F_{rol} – сила тертя кочення,

$$F_{rol} = \mu_{rol} \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha), \quad (4)$$

F_{gr} – сила опору при русі з кутом α ,

$$F_{gr} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha), \quad (5)$$

F_a – аеродинамічний опір,

$$F_a = k_a \cdot V^2, \quad (6)$$

k_a – загальний аеродинамічний коефіцієнт,

$$k_a = \frac{C_x \cdot \rho_a \cdot S}{2}. \quad (7)$$

У наведених вище виразах зазначено, що: μ_{rol} – коефіцієнт тертя кочення; m – маса електромобіля; g – прискорення вільного падіння; α – кут нахилу дороги; C_x – коефіцієнт опору повітря, для легкових автомобілів 0,30 – 0,49 [11]; S – площа лобового опору; V – швидкість електромобіля; ρ_a – щільність повітря.

Створені двигуном крутні моменти на осях коліс T_1 і T_2 реалізуються у вигляді тягових сил $F_{wh,1}$ і $F_{wh,2}$. Вони можуть відрізнитися через різні динамічні компоненти:

$$F_{wh,i} = \frac{T_i - J_{wh} \frac{d\omega_i}{dt}}{r_{wh}}, \quad (8)$$

де J_{wh} – момент інерції колеса,

r_{wh} – радіус колеса,

ω_i – кутова швидкість i -го колеса.

Ці крутні моменти є рушійними для ЕМБ, якщо їх значення не перевищують значень сил зчеплення коліс з дорогою $F_{adh,1}$ і $F_{adh,2}$:

$$\frac{T_1}{r_{wh}} \leq F_{adh,1}, \quad (9)$$

$$\frac{T_2}{r_{wh}} \leq F_{adh,2}. \quad (10)$$

Сила зчеплення в даному випадку є реакцією на прикладений до колеса тяговий момент і є силою тертя ковзання, яка виникає між проїжджою частиною і колесом.

Сила зчеплення дорівнює:

$$F_{adh,i} = \psi_i(\omega_i) P_{n,i}, \quad (11)$$

де $\psi_i(\omega_i)$ – коефіцієнт зчеплення в залежності від швидкості обертання i -го колеса,

$P_{n,i}$ – нормальна сила тиску i -го колеса.

$$P_{n,i} = m_i g \cos(\alpha), \quad (12)$$

де m_i – частина маси ЕМБ i -го колеса.

Результуюча сила тяги електромобіля F_{tr} , є сумою сил тяги ведучих коліс:

$$F_{tr} = F_{wh,1} + F_{wh,2}, \quad (13)$$

і відповідно до 2-го закону Ньютона рух ЕМБ описується рівнянням:

$$F_{tr} - F_{res} = m_{\Sigma} \frac{dV}{dt} = F_d, \quad (14)$$

де m_{Σ} – приведена до швидкості V маса ЕМБ з урахуванням інерції J_{wh} двох ведених коліс:

$$m_{\Sigma} = m + 2 \frac{J_{wh}}{r_{wh}^2}. \quad (15)$$

У цьому випадку сили тяги коліс дорівнюють відповідним силам тертя ковзання:

$$F_{wh,i} = F_{sl,i} = \mu_{sl,i}(s_i) P_{n,i}, \quad (16)$$

де $\mu_{sl,i}(s_i)$ – коефіцієнт тертя ковзання, залежний від ковзання i -го колеса.

$$s_i = \frac{\omega_i r_{wh} - V}{\omega_i r_{wh}}. \quad (17)$$

Характер цієї залежності для різних дорожніх умов (I – сухий асфальт, II – мокрий асфальт, III – сніг, IV – лід) представлена на рис. 1 [8].

При постійному нормальному тиску колеса на дорогу залежність $F_{wh} = f(s)$ має такий же характер, як

$i \mu_{sl}(s)$.

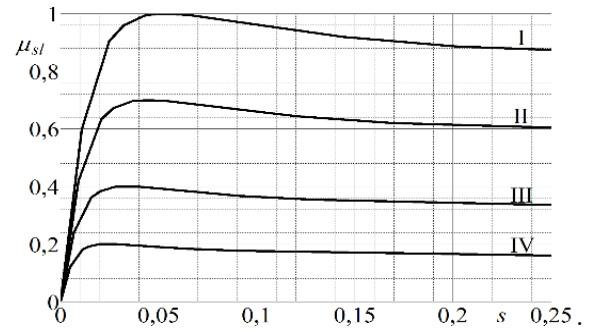


Рисунок 1. Залежність коефіцієнта тертя ковзання від прослизання

При наїзді одного колеса на ділянку зі зменшеним зчепленням через диференціал значення моментів на пів осях коліс T_1 і T_2 залишаються незмінними і рівними.

$$T_A + J_{wh} \frac{d\omega_1}{dt} = T_1 = T_2 = \frac{i_{tr} T \eta_{tr}}{2}, \quad (18)$$

При цьому момент ковзання 2-го колеса став рівним T_B , і $T_A > T_B$. Це призводить до прискорення його обертання відповідно до рівняння: прискорення його обертання відповідно до рівняння:

$$T_A - T_B = J_{wh} \frac{d(\omega_2 - \omega_1)}{dt}. \quad (19)$$

При цьому збільшення швидкості буксування колеса ω_2 супроводжується збільшенням кутової швидкості веденої шестерні диференціала ω_{inh} відповідно до рівняння:

$$\omega_{inh} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}. \quad (20)$$

Швидкість руху не може зменшитися миттєво, тому збільшення швидкості колеса відбувається за рахунок збільшення швидкості прослизання з прискоренням:

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{T_A - T_{wh,2}(s)}{J_{wh}} + \frac{d\omega_1}{dt}. \quad (21)$$

Крутний момент, створюваний на колесах з диференціалом, визначається за рівнянням:

$$T_d = \Delta \omega \frac{C_d}{p}, \quad (22)$$

де C_d – коефіцієнт пружності механічного зв'язку двигуна з диференціалом.

Математична модель ЕП ЕМБ у структурній формі, представлена на рис. 2. Механічна частина моделі побудована з урахування наведених вище рівнянь.

Математичні моделі в структурній формі системи керування, силового перетворювача та двигуна додаються спрощено, як блоки. Для складання імітаційної моделі блоки системи керування та силового перетворювача будуть зібрані за моделями елементів силових електричних кіл.

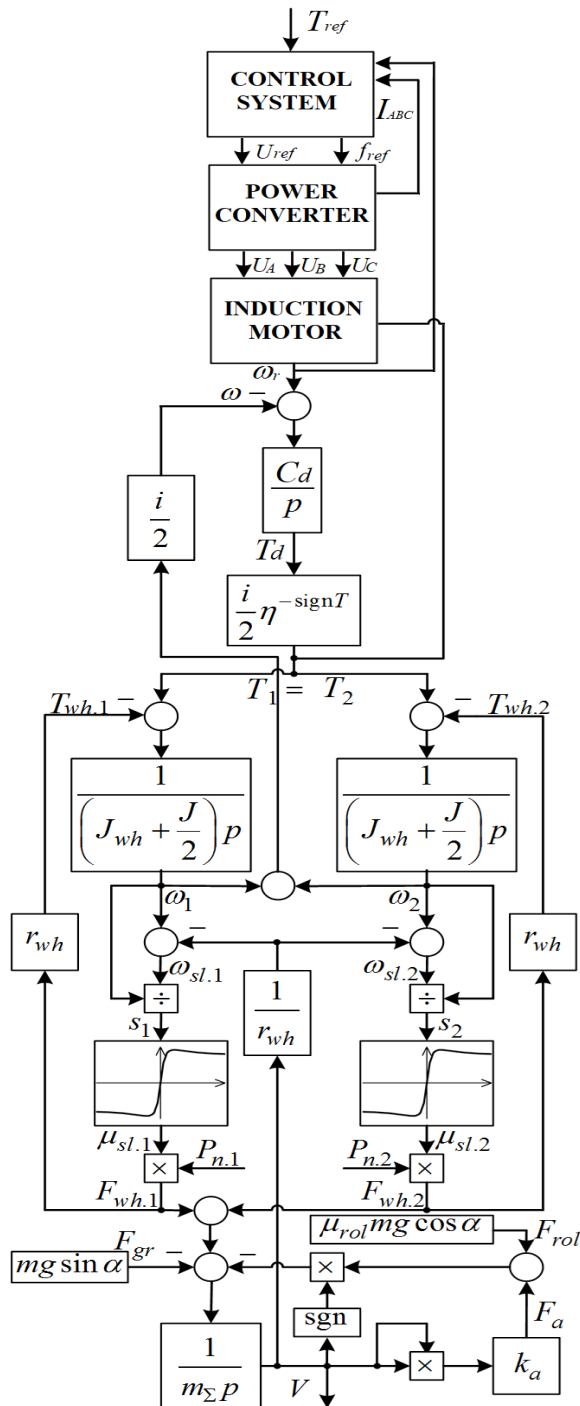


Рисунок 2. Математична модель у структурній формі

Еталонним значенням для ЕП є T_s - опорний момент, який імітує натискання водія педалі. Система керування реалізує векторне керування, а саме пряме

керування моментом (DTC) [12]. На підставі опорного сигналу, а також поточного значення струмів статора і потокозчеплення система управління розраховує частоту і напругу, необхідні для підтримки моменту, який необхідно прикласти до обмотки статора двигуна. Виходом системи керування є імпульси, що керують ключами силового перетворювача.

До складу силового перетворювача входить автономний інвертор на основі IGBT-транзисторів, а також гальмівний резистор. Параметри перетворювача вибрано наступними: опір ключів $R_k = 1$ мОм. Падіння прямої напруги, а також падіння напруги на зворотних діодах прийнято $V_f = 1,4$ В. Час наростання імпульсу $t_r = 1$ мкс, а час спаду $t_f = 2$ мкс.

Модель асинхронного двигуна складається з рівнянь у координатах $d-q$. Математичний опис базується на [12]. Вибір асинхронного двигуна здійснювався методом еквівалентної потужності з використанням стандартного міського циклу WLTP [13], як базова циклограма руху. Було обрано двигун серії АІР180М2 потужністю $P_n = 30$ кВт, номінальною швидкістю $n_n = 2935$ об/хв і ККД $\eta = 91\%$.

Модель дозволяє моделювати ЕП з величезною кількістю змінних параметрів – моделювати процеси буксування одним або двома колесами, різку зміну параметрів двигуна, вихід з ладу одного з компонентів силового ланцюга тощо.

З використанням пакетів Simulink та SimPower програмного комплексу Matlab, а також структурної схеми ЕП (рис. 2), була синтезована імітаційна модель ЕП, яка представлена на рис. 3. В якості параметрів, що використовуються в моделі, взято характеристики ЕМБ, побудованого на базі кафедри «АЕМС» НТУ «ХП». Для його створення за основу був взятий автомобіль «Ланос» з розрахунковою масою $m = 1500$ кг. Габаритні розміри та інші параметри взяті з [14]. Модель складається з акумулятора, гальмівного резистора, силового перетворювача, регулятора швидкості (для обмеження максимальної швидкості), регулятора моменту, асинхронного двигуна, блоку механіки, блоку формування керуючого сигналу та блоків вимірювання.

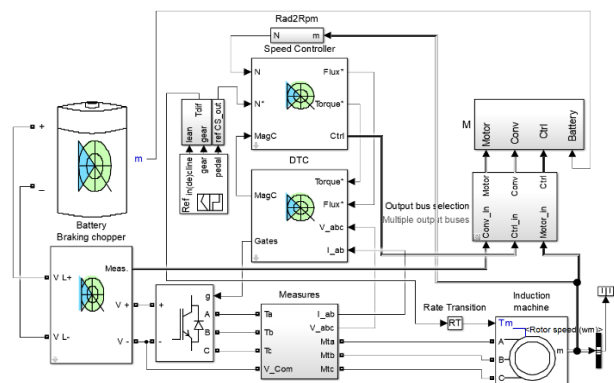


Рисунок 3. Імітаційна модель ЕП

На рис. 4 показана модель блоку DTC.

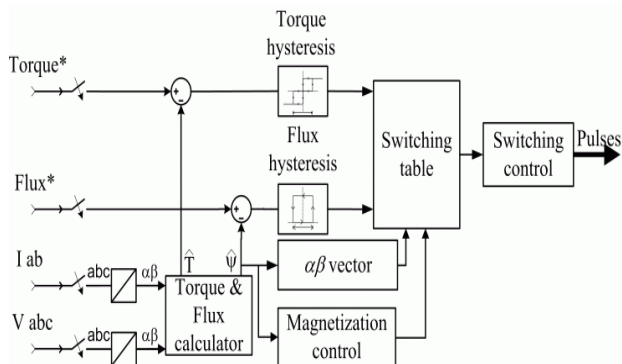


Рисунок 4. Загальна модель системи керування

Структура системи керування побудована на блоках пакету SimPower, Matlab. Блок калькулятора Torque & Flux використовується для оцінки компонентів $\alpha\beta$ потоку двигуна та електромагнітного моменту. Цей калькулятор ґрунтується на синтезі рівняння двигуна. Блок вектора $\alpha\beta$ використовується для знаходження сектора площини $\alpha\beta$, в якому лежить вектор потоку. Площина $\alpha\beta$ поділена на шість різних секторів, що розташовані на 60 градусів один від одного. Блоки Flux & Torque Hysteresis містять дворівневий компаратор гістерезису для керування потоком і тривірневий компаратор гістерезису для керування крутним моментом. Опис гістерезисних компараторів наведено нижче. Блок Switching table містить дві довідкові таблиці, які вибирають конкретний вектор напруги відповідно до вихідних даних компараторів Flux & Torque Hysteresis. Цей блок також здійснює початковий потік у машині. Блок керування перемиканням використовується для обмеження частоти комутації інвертора до максимально встановленого значення [15].

На рис. 5 представлена модель механічної частини ЕП. Моделі формування складових навантаження, передавального числа, а також вузла формування нормальних сил тиску представлені на рис. 6.

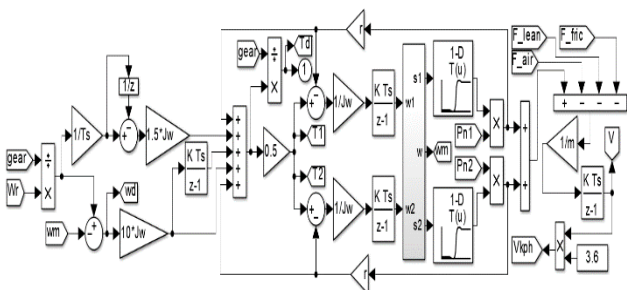


Рисунок 5. Комп'ютерна модель механічної частини ЕП

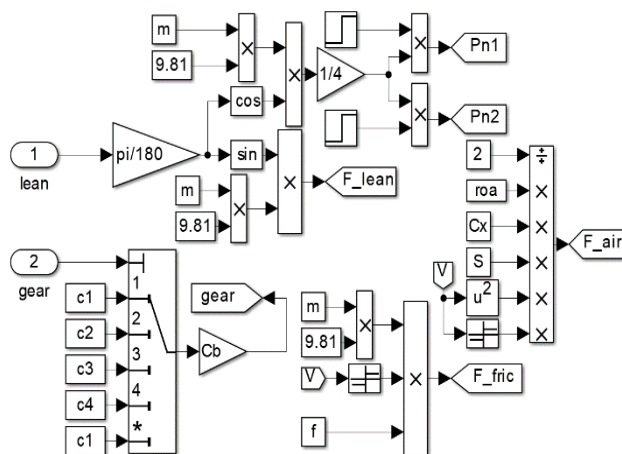


Рисунок 6. Модель формування складових навантаження ЕП, нормальних сил тиску і-го колеса, передатного відношення на заданій передачі

Механічна модель складена відповідно до наведених вище рівнянь та структурної схеми (рис.2). Позначення моделі механічної частини: T_s – крок дискретизації моделі; W_r – швидкість електродвигуна; w_1 і w_2 – кутові швидкості коліс; V , V_{kph} – лінійна швидкість ЕМБ у м/с та км/год; F_{fric} , F_{air} , F_{lean} – сила тертя, сила опору повітря та сила тяжіння, що діють на ЕМБ при русі під гору; gear – передавальне число трансмісії; r – радіус колеса; J_w – приведена інерція колеса; T_d – момент на виході трансмісії; m – повна маса ЕМБ; T_1 , T_2 – моменти на колесах 1 і 2; w_m – середня швидкість двох коліс; s_1 , s_2 – прослизання коліс 1 і 2.

Результати моделювання початку руху електромобіля, а також прямолінійного руху з проїздом одного колеса по поверхні дороги зі знизеним зчепленням наведені на рис. 7-14. На рис. 7 показано перехідний процес опорних сигналів.

На рис. 7 представлено вихідні дані для моделювання. Нахил дороги встановлено 0° . Крутний момент встановлюється у відносних (до номінальних) одиницях.

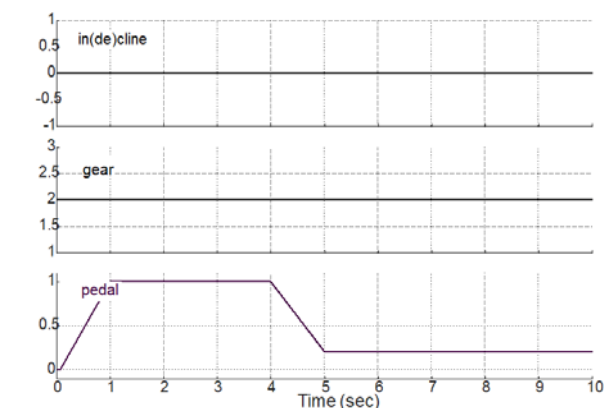


Рисунок 7. Діаграма опорних сигналів

На рис. 8 показані перехідні процеси швидкості та крутного моменту двигуна при пуску з повним зчепленням коліс. Швидкість досягає встановленого значення за 6 с. Крива крутного моменту відповідає моменту відліку від педалі (номінальний крутний момент двигуна $T_n = 95$ нм).

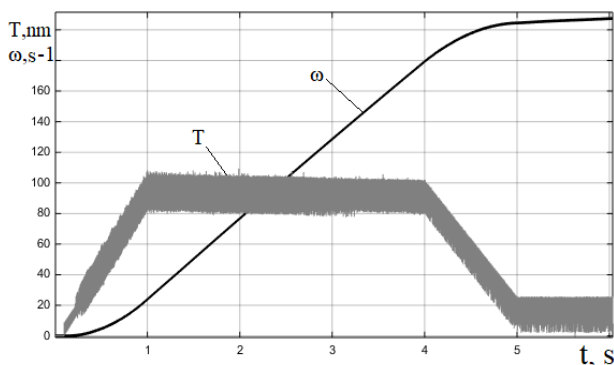


Рисунок 8. Швидкість і момент двигуна при пуску без пробуксовки

На рис. 9 зображено перехідні графіки швидкостей і моментів двох коліс без пробуксування. На графіках видно повну їх рівність.

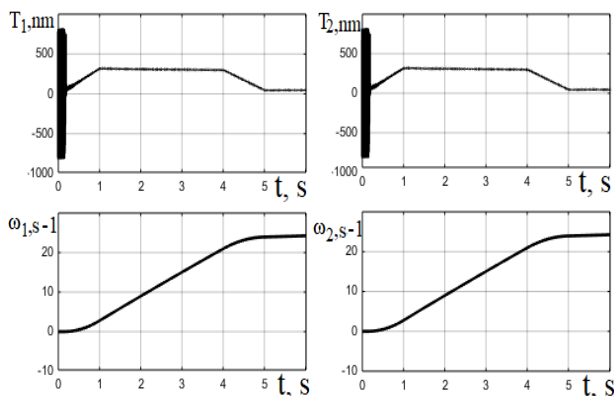


Рисунок 9. Швидкості та крутні моменти дво коліс при рушанні без пробуксовки

На рис. 10 зображено графік перехідних процесів швидкостей і крутних моментів двох коліс, одне з яких з моменту запуску знаходилося на поверхні дороги зі зниженим коефіцієнтом зчеплення. Коефіцієнт зчеплення колеса 1 становив $\psi_1 = 0,95$, а другого колеса $\psi_2 = 0,1$. Модель не враховує бічний занос, тому може спостерігатися лише невідповідність швидкостей коліс і лінійна зміна швидкості ЕМБ. Дослідження бокового ковзання передбачає подальше ускладнення моделі.

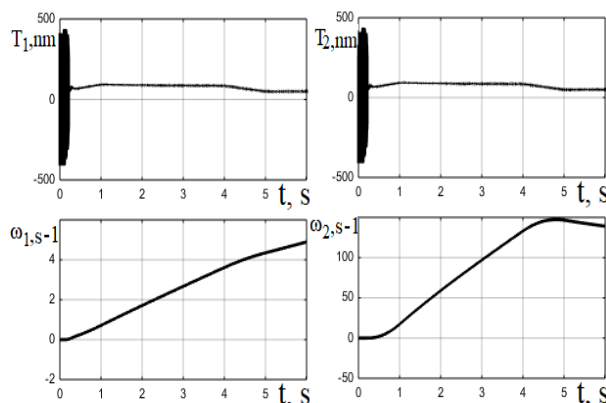


Рисунок 10. Швидкості та крутні моменти двох коліс при рушанні з пробуксуванням другого колеса

З графіків видно, що з моменту пуску перше колесо за такий самий час набрало кутову швидкість $\omega_1 = 5$ рад/с, а друге $\omega_2 = 150$ рад/с. Крутні моменти, прикладені до обох коліс, однакові і відповідають розподілу диференціала. Система керування підтримує постійний момент подачі і значно знижує навантаження за рахунок відсутності зчеплення з дорожнім покриттям в режимі пробуксовки.

На рис. 11 показано графік лінійної швидкості ЕМБ під час розгону без пробуксовки (I) і з пробуксовкою (II). Фактичні значення швидкості з пробуксовкою будуть відрізнятися через появу бічного заносу при пробуксовці одного з коліс.

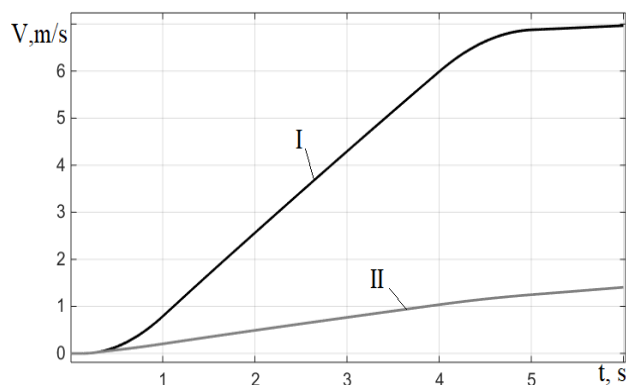


Рисунок 11. Лінійні швидкості ЕМБ з і без пробуксовки

Лінійна швидкість з повним тяговим зусиллям досягає $V = 7$ м/с для прискорення $\Delta t = 5$ с і продовжує плавно зростати зі зниженим опорним крутним моментом. Швидкість при пробуксовці одного колеса зростає значно повільніше. У цьому випадку складові моменти навантаження, що залежать від швидкості, значно менші. Динамічний момент навантаження також менший.

На рис. 12 показано графік перехідних процесів швидкостей двох коліс у фіксованому режимі руху, одне з яких наїжджає на дорожнє покриття зі зниже-

ним коефіцієнтом зчеплення.

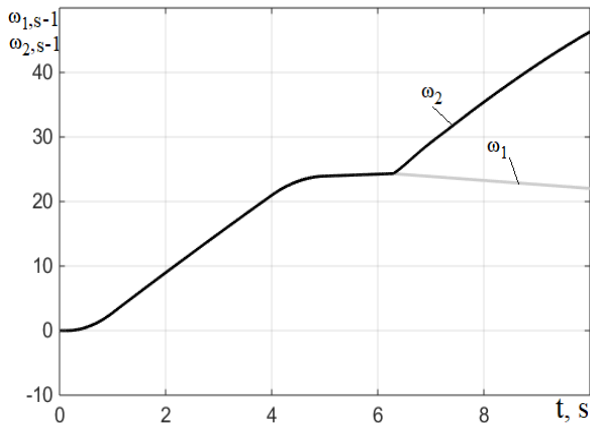


Рисунок 12. Швидкості двох коліс із пробуксовкою при сталому прямолінійному русі

Розгін електромобіля починається з повного зчеплення двох коліс. У момент часу, близький до $t = 6$ s, швидкості досягають квазістаціонарних значень і є практично постійними. У момент часу $t = 6,3$ с друге колесо майже повністю втрачає зчеплення. Коефіцієнт зчеплення другого колеса стає $\psi_2 = 0,1$, а першого залишається незмінним $\psi_1 = 0,95$. Після цього швидкість першого колеса ω_1 , яке жорстко пов'язане з дорожнім покриттям, починає зменшуватися за рахунок того, що загальний момент навантаження перевищує момент T_1 , який підводиться до першого колеса. Швидкість другого колеса ω_2 , яке втратило зчеплення, починає швидко зростати, оскільки момент T_2 залишається постійним.

На рис. 13 наведено графіки перехідних процесів напруги джерела живлення U_d і струму фази А I_a . Також збільшена зона переходу одного з коліс в режим пробуксовки.

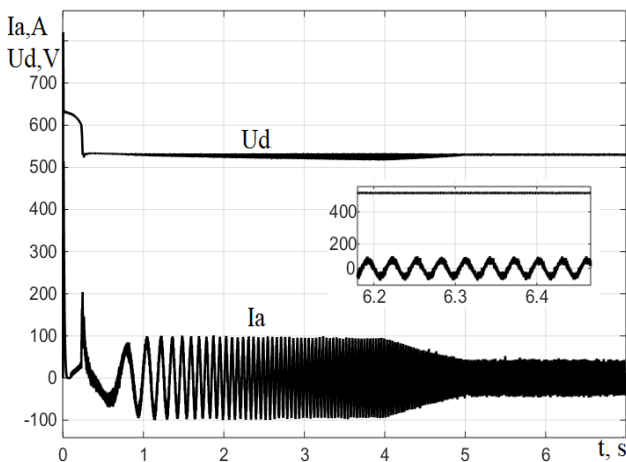


Рисунок 13. Напруга живлення та струм фази А

Одночасно відбувся наїзд на поверхню зі знизеним коефіцієнтом $t = 6,3$ с. З графіків видно, що струм

і напруга не змінилися, оскільки з моменту включення двигуна T_m не змінилося свого значення. Це пов'язано з тим, що система керування успішно працює навіть при різко змінному навантаженні. За цими графіками неможливо визначити момент початку прослизання.

На рис. 14 показано перехідні процеси швидкостей коліс ω_1 , ω_2 , а також швидкість ω_E , яка визначається з рівняння $\omega_E = V/r_{wh}$.

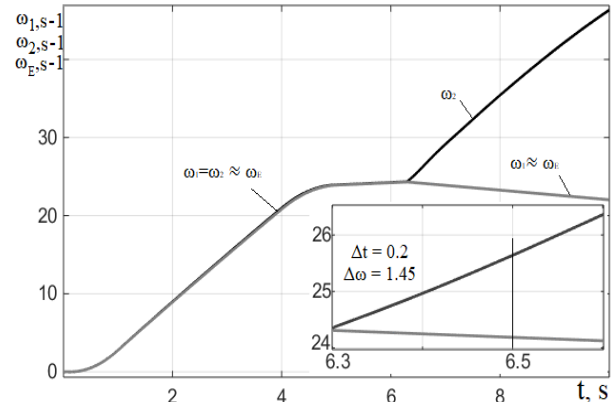


Рисунок 14. Швидкості двох коліс і приведена до ЕМБ кутува швидкість

При заданому коефіцієнті зчеплення $\psi_1 = \psi_2 = 0,95$ розгін відбувався при майже жорсткому з'єднанні коліс з дорожнім покриттям. З графіка видно, що швидкості коліс ω_1 і ω_2 з мінімальним, майже непомітним випередженням відповідають приведеній швидкості ЕМБ ω_E . При наїзді другого колеса на дорожнє покриття зі знизеним коефіцієнтом зчеплення виникає неузгодженість швидкостей коліс. Швидкість ЕМБ, в той же час, також тісно пов'язана зі швидкістю колеса з повним зчепленням. На графіку збільшено показано ділянку переходу в режим ковзання.

На основі отриманих графіків сформульовано основні умови ковзання по відношенню до цього ЕМБ з його конкретними параметрами. Ці умови, згодом, стануть основою для ідентифікації початку ковзного режиму та синтезу системи запобігання ковзному режиму.

В ідеальних умовах середній час прихованого періоду простої реакції водія на світловий сигнал становить близько 0,2 с, на звуковий - 0,14 с.

Час загальної рухової реакції (тривалість прихованого періоду реакції і відповіді) істотно змінюється в залежності від часу, необхідного для завершення відповіді. Так, середній час загальної реакції на увімкнений стоп-сигнал і час витрачений на переведення правої ноги з педалі газу на педаль гальма становить 0,4 - 0,6 с [16].

Виходячи з цього було обрано час ідентифікації входу в режим ковзання, після якого можна буде достовірно виявити режим ковзання. Позначимо цей час $t_s = 0,2$ с. Для цього періоду часу при параметрах, що

використовуються в моделі, розбіжність швидкостей ω_2 і ω_E становить 1,45 рад/с.

На основі отриманих даних запропоновано наступний алгоритм визначення ковзання. Передбачається, що ЕМБ увійшов у режим пробуксовки одного колеса, якщо виконуються такі умови:

$$\begin{cases} \omega_1 \neq \omega_2 \\ \omega_i - \omega_E > 1 \\ \omega_i - \omega_E < 1 \end{cases} \quad (23)$$

де ω_i – швидкість проковзування колеса,

ω_E – швидкість колеса, що не пробуксовує.

Вважаємо, що ЕМБ увійшов у режим пробуксовки двох коліс, якщо виконуються наступні умови:

$$\begin{cases} \omega_1 - \omega_E > 1 \\ \omega_2 - \omega_E > 1 \end{cases} \quad (24)$$

При визначенні пробуксовки за цими співвідношеннями не буде враховуватися блокування коліс при екстремому гальмуванні, коли лінійна швидкість ЕМБ змінюється плавно, а колеса повністю блокуються гальмівними колодками, утворюючи значну розбіжність швидкостей.

V. ВИСНОВКИ

Отримані діаграми повністю відповідають реальним фізичним процесам, що відбуваються в електромобілі і дають підстави вважати, що побудовані математичні та імітаційні моделі є адекватними. Виходячи з цього отримано та проаналізовано електро-механічні перехідні процеси в електроприводі під час розгону з пробуксовкою та наїзду одного колеса на дорожнє покриття зі знизеним зчепленням. В результаті цього аналізу визначено найбільш оптимальний і надійний спосіб визначення режиму заносу для його подальшого усунення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Який вид транспорту найбезпечніший [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://turvopros.com/samyiy-bezopasnyiy-vid-transporta-statistika/>.
- [2] Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. World population prospects: the 2012 revision, highlights [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://population.un.org/wpp/publications/Files/WP2012_Volume-II-Demographic-Profiles.pdf.
- [3] Швеція в 2030 році заборонить двигуни внутрішнього згоряння [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/news/2019/01/23/64457>.
- [4] Транспортні тенденції в національних планах економічного відновлення та стійкості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukraine.europarl.europa.eu/cmsdata/269714/1274845UK.pdf>.
- [5] Serbia installs subsidies for most electrified vehicles [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.electrive.com/2020/03/17/serbia-installs-subsidies-for-most-electrifiedvehicles/>.
- [6] Pacejka H. Tire and Vehicle Dynamics / H. Pacejka. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – P. 672.
- [7] Ghandour R., Victorino A., Doumiati M., Charara A. Tire/road friction coefficient estimation applied to road safety / R. Ghandour, A. Victorino, M. Doumiati, A. Charara // 18th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'10. – 2010. – P. 1485-1490. DOI: 10.1109/MED.2010.5547840
- [8] Rajamani R., Piyabongkarn N., Lew J., Yi K., Phanomchoeng G. Tire-Road Friction-Coefficient Estimation / R. Rajamani, N. Piyabongkarn, J. Lew, K. Yi, G. Phanomchoeng // IEEE Control Systems Magazine. – 2010. – P. 54-69. DOI: 10.1109/MCS.2010.937006
- [9] Muller S., Uchanski M., Hedrick K. Estimation of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient / S. Muller, M. Uchanski, K. Hedrick // Journal of Dynamic Systems Measurement and Control. – 2003. – P. 607–617. DOI: 10.1115/1.1636773
- [10] Bonnick A., Newbold D. A Practical Approach to Motor Vehicle Engineering and Maintenance / A. Bonnick, D. Newbold. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. – P. 384.
- [11] Car Drag Coefficients [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/>.
- [12] Carlos C. Modeling, vector control and DTC: control of asynchronous machines. Hermes Science, Europe Ltd. 2000.
- [13] Більш реалістичні показники споживання палива: новий стандарт їздового циклу WLTP замінив діючий NEDC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.audi.ru/ru/web/ru/innovations/wltp-lp.html>.
- [14] Клепиков В. Б., Семіков А. В. та ін. З досвіду створення електроприводу електромобіля з суперконденсаторним накопичувачем енергії / В. Б. Клепиков, А. В. Семіков та ін. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – Вип. 112 (1121). – С. 195–198.

[15] Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives / B. K. Bose. – Prentice Hall PTR, 2002. – P. 558.

[16] Jurecki R. S., Stańczyk T. L. Driver reaction time to lateral entering pedestrian in a simulated crash traffic situation / R. S. Jurecki, T. L. Stańczyk // Transporta-

tion Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. – 2014. – P. 22-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.08.006>

Стаття надійшла до редакції 31.12.2023

SLIP MODES MODELING OF ELECTRIC VEHICLE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

SENCHENKO S.O.

Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0486-2471;

VOROBIOV B.V.

Ph.D, Head of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0264-354X;

KYRYLENKO Y.O.

Assistant of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0331-617X;

LIKHNO Y.V.

Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Yaroslav.Likhno@ieec.khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7082-7562;

KHAN L.

Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: seanhanzi@mail.com, ORCID: 0000-0001-8182-0040;

Purpose. Creation a simulation model of electric drive of an electric vehicle with the possibility of modeling in slip modes, as well as the subsequent determination of the slippage detection method as early as possible to further reducing or preventing slippage.

Methodology. The study used the equivalent power method to select an asynchronous motor. Using the methods of mathematical modeling in the visual programming environment, a simulation model of the electric drive was created.

Findings. The mathematical models in the structural form of the control system, power converter and motor are added in a simplified way, as the blocks. For compiling a simulation model, the blocks of the control system and the power converter will be assembled using models of elements of power electric circuits. The model allows the ED simulation with a huge number of parameters varying – modeling slipping processes with one or two wheels, a sharp change in engine parameters, failure of one of the components of the power circuit, etc. Using the Simulink and SimPower packages of the Matlab software package, as well as the block diagram of the electric drive, a simulation model of the ED was synthesized. Computer simulations were carried out for two modes: start of electric vehicle movement, when one of the wheels was on the road surface with a reduced coefficient of adhesion (0,1) from the moment of start-up and acceleration with a collision with a surface with a reduced coefficient of adhesion (0,1) with one wheel at the moment of time of 6.3 s. The obtained diagrams fully correspond to the real physical processes occurring in the electric vehicle and give reason to believe that the constructed mathematical and simulation models are adequate. Based on this, electromechanical transients in the electric drive during acceleration with slipping and one wheel hitting a road surface with reduced traction were obtained and analyzed. As a result of this analysis, the most optimal and reliable way to determine the skidding mode for its further elimination was determined.

Originality. Simulation model of the asynchronous electric drive of an electric vehicle with a detailed mechanical part, taking into account the mechanical differential gear, was built. The resulting model allows simulating the processes of slipping with one or two wheels, a sharp change in motor parameters, failure of one of the components of the power circuit, etc.

Practical value. Based on the obtained results the basic conditions for slipping in relation to this electric vehicle were formulated. According to the obtained data, an algorithm for determining the beginning of the slipping mode is proposed.

Keywords: electric drive; electric vehicle; tire slip; slippage; asynchronous motor; simulation model; mechanical differential.

REFERENCES

- [1] Yakiy vyd transportu naibezpechnishyi. [What type of transport is the safest] [Electronic resource] – Access mode: <http://turvopros.com/samyiy-bezopasnyiy-vid-transporta-statistika/>. (in Ukrainian).
- [2] Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. World population prospects: the 2012 revision, highlights [Electronic resource] – Access mode: https://population.un.org/wpp/publications/Files/WP2012_Volume-II-Demographic-Profiles.pdf. (in Ukrainian).
- [3] Shvetsiia v 2030 hotsi zaboronyt dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia. [Sweden will ban internal combustion engines in 2030] [Electronic resource] – Access mode: <https://www.epravda.com.ua/news/2019/01/23/644572/>. (in Ukrainian).
- [4] Transportni tendentsii v natsionalnykh planakh ekonomichnoho vidnovlennia ta stiikosti. [Transport trends in national economic recovery and sustainability plans] [Electronic resource] – Access mode: <https://ukraine.europarl.europa.eu/cmsdata/269714/1274845UK.pdf>. (in Ukrainian).
- [5] Serbia installs subsidies for most electrified vehicles [Electronic resource] – Access mode: <https://www.electrify.com/2020/03/17/serbia-installs-subsidies-for-most-electrifiedvehicles/>. (in Ukrainian).
- [6] Pacejka H. (2012). Tire and Vehicle Dynamics. Oxford, Butterworth-Heinemann.
- [7] Ghandour R., Victorino A., Doumiati M., Charara A. (2010). Tire/road friction coefficient estimation applied to road safety. *18th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'10*, 1485-1490. DOI: 10.1109/MED.2010.5547840
- [8] Rajamani R., Piyabongkarn N., Lew J., Yi K., Phanomchoeng G. (2010). Tire-Road Friction-Coefficient Estimation. *IEEE Control Systems Magazine*, 54-69. DOI: 10.1109/MCS.2010.937006
- [9] Muller S., Uchanski M., Hedrick K. (2003). Estimation of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 607–617. DOI: 10.1115/1.1636773
- [10] Bonnick A., Newbold D. (2011). A Practical Approach to Motor Vehicle Engineering and Maintenance. Oxford, Butterworth-Heinemann.
- [11] Car Drag Coefficients [Electronic resource] – Access mode: <https://www.buildyourownracecar.com/racecar-aerodynamics-basics-and-design/>.
- [12] Carlos C. (2000). Modeling, vector control and DTC: control of asynchronous machines. Hermes Science, Europe Ltd.
- [13] Bilsh realistychns pokaznyky spozhyvannia palyva: novyi standart yizdovoho tsykladu WLTP zaminyv diiuchy NEDC. [More realistic fuel consumption: the new WLTP driving cycle standard will replace the current NEDC] [Electronic resource] – Access mode: <https://www.audi.ru/ru/web/ru/innovations/wltp-lp.html>. (in Ukrainian).
- [14] Klepikov V. B., Semikov A. V. ta in. (2015). Z dosvidu stvorennia elektropryvodu elektromobilia z supe kondensatornym nakopychuvachem enerhii. [From the experience of creating electric drive electric vehicle with a super capacitor energy storage]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. [Bulletin of the National Technical University “KhPI”]. Kharkiv: NTU «KhPI», issue 112 (1121), 195–198 (in Ukrainian).
- [15] Bose B. K. (2002). Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall PTR.
- [16] Jurecki R. S., Stańczyk T. L. (2014). Driver reaction time to lateral entering pedestrian in a simulated crash traffic situation. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 22-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.08.006>

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE CASE OF STATIC ECCENTRICITY OF A TWO-POLE INDUCTION MOTOR WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR

- KOTSUR I.M. PhD, Associate Professor of the Electrical Machines Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6394-7849> ;
- KOTSUR M.I. PhD, Associate Professor of the Electrical and Electronic Devices Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kotsur_m@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0072-5437>;
- YARIMBASH D.S. Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of the Electrical Machines Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2324-9303>;
- DYVCHUK T.Ye. PhD, Associate Professor of the Electrical Machines Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8779-2615>;
- BEZVERKHANIA Yu. S. PhD, Associate Professor of the Electrical Machines Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: juliakafedraem@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8779-2615>;
- OZEROV V.S. Master of the Department of Electric Machines at Zaporizhzhia National University 'Zaporizhzhia Polytechnic', Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vovavorobiov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8059-7911>

Purpose. Correction of the mathematical model of electromagnetic processes in a two-pole induction motor with a short-circuited rotor, taking into account static rotor eccentricity to identify diagnostic correlations.

Methodology. Analytical modeling using the method of specific magnetic conductivity, mathematical modeling of electromagnetic fields in a three-phase induction motor with a short-circuited rotor using methods of electromagnetic field theory and finite element methods.

Obtained results. The necessity of improving mathematical models for induction motors with short-circuited rotors to establish new or refine connections between diagnostic features and diagnosed defects has been demonstrated. Refined mathematical expressions for calculating the specific conductivity of non-uniform air gaps in induction motors with static eccentricity are provided. Modeling was performed using the FEMM environment for a statically eccentric two-pole induction motor with a short-circuited rotor. It has been proven that the harmonic order values obtained using the numerical-field method are consistent with those obtained analytically.

Findings. Based on the field approach and using the finite elements method, an analysis of the distribution of magnetic field in a two-pole induction motor with a short-circuited rotor was conducted. Harmonic analysis of the magnetic field in the air gap was performed to identify the fundamental harmonic and higher and lower-order harmonics when eccentricity occurs. The influence of static rotor eccentricity on the electromagnetic processes of the induction motor was analyzed.

Practical value. The results of the study can be utilized for functional diagnosis of the rotor winding of induction motors based on the radial component of the magnetic field. This will contribute to enhancing the reliability of induction motors and enable the prevention of failure in induction motors with short-circuited rotors.

Keywords: induction motor, static eccentricity, mathematical model, Fourier series, error, magnetic conductivity, amplitude, harmonic.

I. INTRODUCTION

Induction motors (IM) with short-circuited rotors are widely utilized across various industries for electricity generation and as electric drives. Recently, there has been

increasing attention to the diagnosis of induction motors (IM) aimed at preventing sudden failures and improving the technical and economic performance of their utilization. In induction motors (IM), rotor eccentricity often occurs, which is accompanied by non-uniformity in the

air gap. [1]. According to various sources [1], from 20 to 40% of failures in induction motors are attributed to eccentricity, which can be caused by manufacturing technological errors, wear during usage, violation of operating conditions, and due to poor repair quality.

In general, there are two types of eccentricity: static eccentricity (which remains unchanged in time and space) - the eccentric position of the rotor in the stator slot; and dynamic eccentricity - the misalignment of the rotor surface with respect to its axis of rotation.

The practice of operating induction motors shows that a significant portion (up to 50%) [4] – [7] operates for extended periods with static eccentricity (SE) of the rotor, which significantly exceeds their technological eccentricity (tolerated during manufacturing). The static eccentricity (SE) of the rotor in induction motors can be caused by inaccuracies in the manufacturing of bearing shields and stators, incorrect centering of the rotor, and misalignment of the drive mechanism. Static eccentricity (SE) in induction motors can also occur during operation. In this case, its appearance may be caused by bearing wear or damage, displacement of supports, or external forces acting on the rotor shaft.

The operation of induction motors with rotor static eccentricity (SE) within the air gap does not immediately lead to its failure, but it does result in deterioration of electromechanical characteristics, energy performance, and consequently, an increase in additional energy losses. Rotor eccentricity in induction motors is accompanied by non-uniformity in the air gap, which, in turn, leads to the emergence of additional magnetic fields.

Distortion of the magnetic field in the air gap creates unidirectional magnetic pull [9], resulting in a decrease of maximum and starting torques within 20% and 8% respectively, while slip increases by 10% [11]. Local heating and motor vibration increase, and additional harmonic components appear. As a result, the reliability and service life of the induction motor decrease. With significant displacement, the rotor begins to come into contact with the stator (see Figure 1), leading to significant heating of their cores, melting or damage to the "squirrel cage". This accelerates the deterioration of the stator winding insulation with subsequent short-circuiting within it. Typically, the cost of a major repair of the motor after such damage is comparable to the cost of the motor itself.

In the study [4], the authors noted that general-purpose two-pole induction motors with medium power ratings up to 1000 V, after the first rewinding of the windings, subsequently experience a much higher frequency and intensity of sudden failures, mainly associated with static eccentricity (SE) [4].



Figure 1. Contact of the rotor with the stator of the induction motor due to the presence of static eccentricity

Timely detection of the presence and magnitude of rotor eccentricity will not only reduce electricity consumption but also prevent damage to the IM motor.

II. ANALYSIS OF LAST RESEARCHES

There are several main methods of diagnosing electric motors: vibration analysis, electromagnetic (based on measuring electromagnetic fields), and thermal methods.

Electromagnetic diagnostics are based on measuring electromagnetic fields and are quite relevant as they provide accurate diagnostics without direct access to the induction motor. They are based on the principle that any disturbances during the operation of the electrical or mechanical components of the AC motor directly lead to changes in the magnetic fields in the air gap. In the work [11], a methodology for diagnosing the wear of sleeve bearings in AC motors is proposed based on changes in the amplitude values of electromagnetic induction in the air gap of the motor. In this case, the diagnosis of the bearing condition is carried out during the operation of the electric motor.

The magnetic field in the air gap of the electric motor can be accurately modeled using the method of specific magnetic conductivity [1].

For mathematical modeling of the air gap at various values of eccentricity, it is necessary to consider the dependence of the specific magnetic conductivity of the gap on the rotor angle rotation.

Traditionally, to calculate the specific magnetic conductivity of a smooth air gap with rotor eccentricity mathematical expressions obtained by expanding into a Fourier series are used [4]. In article [5], a specific case is considered where eccentricity occurs when one of the rotor supports is removed. Therefore, a modeling approach is proposed by expanding into a Fourier series the dependence of the average value (for all laminations of the rotor core) of the specific magnetic conductivity of the air gap on the angle along the air gap, taking into account the serration of the air gap.

Other variants of eccentricity, such as radial displacement of the rotor axis relative to the longitudinal axis of the stator, are not considered. In all cases, only the zeroth and first terms of the series are considered.

Despite the thorough examination of specific aspects of modeling the magnetic permeance in the air gap under rotor eccentricity, the complete picture of determining the

specific magnetic conductivity of this gap is not fully revealed, especially at high values of eccentricity.

There is a sufficient number of modern computer programs that implement the solution of electromagnetic field differential equations using the finite element method, such as ANSYS, Maxwell, FEMM, and others. In this work, calculations of magnetic presence are carried out using the FEMM program, which has several advantages, such as simplicity, low system requirements, and an open license.

A significant number of scientific works [2] – [7] are dedicated to the study of electromagnetic processes in squirrel-cage rotor induction motors with eccentricity. A distinctive feature of publications [6] – [12] is the application of field methods for analyzing electromagnetic processes in induction motors, with the determination of influencing factors. This ensures the identification and justification of reliable diagnostic signs of rotor eccentricity.

For the improvement of electromagnetic diagnostics, detailed research and analysis of electromagnetic processes in squirrel-cage rotor induction motors with static eccentricity are necessary. This requires numerical-field determination of electromagnetic and energy parameters.

III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

The aim of the study is to improve the mathematical model of electromagnetic processes in a two-pole squirrel-cage induction motor with a short-circuited rotor, considering static rotor eccentricity, in order to establish new or refine existing relationships between diagnostic indicators and diagnosed defects.

IV. EXPOUNDING THE MAIN MATERIAL AND RESULTS ANALYSIS

Static eccentricity occurs when the rotor axis is displaced radially or angularly relative to the longitudinal axis of the stator, while the stator and rotor axes remain mutually immobile [13].

The magnitude of the relative static eccentricity is typically accepted as:

$$\varepsilon = \frac{d}{\delta_m} \quad (1)$$

where d - the displacement of the rotor axis from the stator axis; δ_m – the magnitude of the nominal air gap between the rotor and stator in concentric position

In static eccentricity, the air gap magnitude is solely a function of the rotor position (angle of rotor rotation). The configuration of the air gap and its minimum value remain unchanged over time [14]:

$$\delta(\alpha) = \delta_m \cdot (1 - \varepsilon \cdot \cos(\alpha))$$

The variation of the air gap magnitude under static eccentricity is depicted in Figure 3.

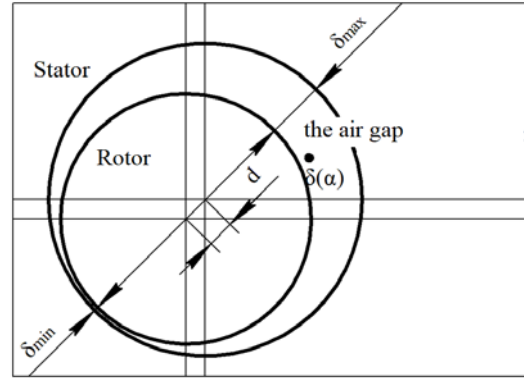


Figure 2. Schematic diagram of the motor under static eccentricity

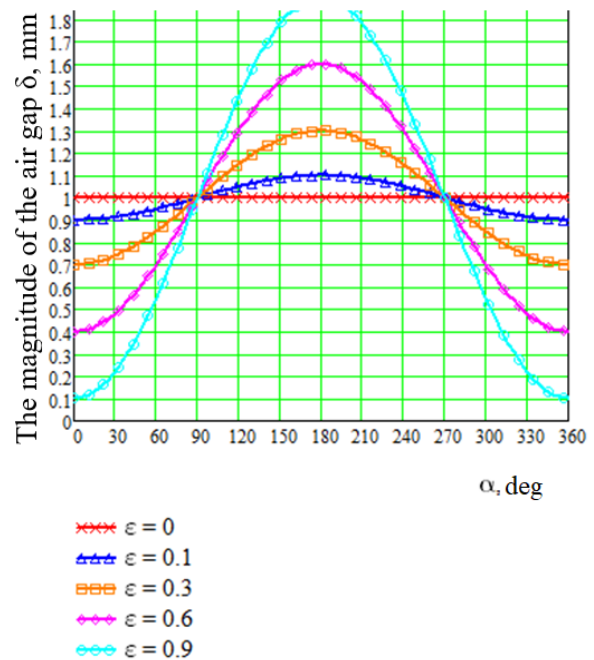


Figure 3. Dependency $\delta(\alpha)$ at $\delta_m = 1\text{mm}$

From Figure 2, it follows that under static eccentricity, in the regions of (0, 90) and (270, 360) degrees, the magnitude of the air gap is less than that in a motor operating normally, leading to a decrease in specific magnetic conductivity (Figure 4).

According to the specific magnetic conductivity method, the magnetic field in the air gap is determined by the expression [8], [14] - [17]:

$$B_\delta(\alpha) = F(\alpha, t) \cdot \Lambda_\delta(\alpha, t) \quad (2)$$

where $F(\alpha, t)$ – the magneto motive force in the air gap (generally equal to the sum of the reluctances of the stator winding and the rotor cage), A ; α – angular coordinate from the inner circle of the stator; Λ_δ – specific magnetic conductivity of the air gap, H/m^2 .

In the presence of eccentricity in the air gap, addi-

tional conductivity harmonics arise, which are determined by expanding the conductivity of the non-uniform gap into a Fourier series [7], [18]:

$$\Lambda(\alpha) = \frac{\mu_0}{\delta_m} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k \cdot \cos(k \cdot \alpha) \quad (3)$$

where λ_k – the amplitude of the k-th harmonic of conductivity of the air gap.

The dependency of the specific magnetic conductivity of the smooth air gap on the angle during rotor eccentricity according to [4] is given by:

$$\Lambda = \frac{\mu_0}{\delta_m} \cdot \frac{1}{1 - \varepsilon \cdot \cos(\alpha)} \quad (4)$$

Expanding the second multiplier of this expression into a Fourier series, have:

$$\Lambda(\alpha) = \frac{\mu_0}{\delta_m} \cdot \left(\lambda_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k \cdot \cos(k \cdot \alpha) \right) \quad (5)$$

where the general term of the series is

$$\lambda_k = 2 \cdot \frac{\left(1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2}\right)^k}{\varepsilon^k \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (6)$$

By the d'Alembert criterion, the series converges when $\varepsilon < 1$ [19].

The results of modeling the specific magnetic conductivity of the air gap in the form of a Fourier series are graphically represented in Figure 3 and Figure 4.

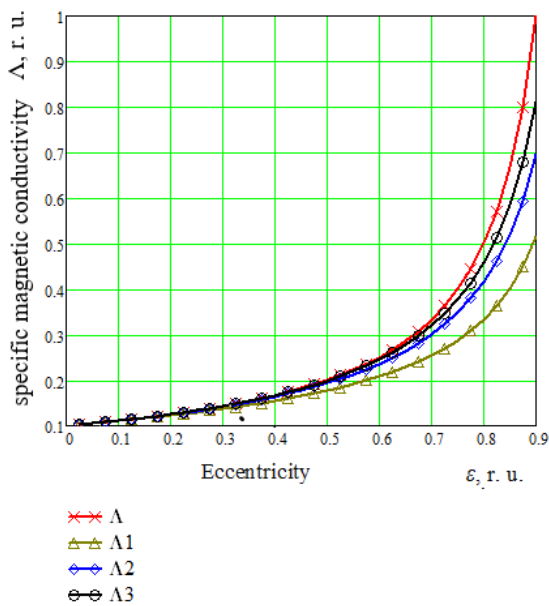


Figure 4. Dependence of the specific magnetic conductivity of the air gap on the eccentricity for different numbers of terms in the series

The dependence of the specific magnetic conductivity of the air gap $\Lambda(\varepsilon)$ on the eccentricity exhibits a strongly pronounced non-linear character. If only the first two terms of the series are considered, starting from a value of $\varepsilon = 0.5$ If only the first two terms of the series are considered, starting from a value of $\Lambda(\varepsilon)$ sharply decreases. For example, at $\varepsilon = 0.9$ the error in determination will reach 40%. Accounting for the third and fourth terms of the series reduces it by more than 10 times (to 8%).

In Figure 4, the results of modeling the distribution of the specific magnetic conductivity of the air gap as a function of the geometric angle α in the polar coordinate system for different numbers of series terms are presented.

The spatial distribution of the magnetic field induction in the air gap at $\rho=1$ according to [4] and considering the expansion of the specific conductivity of the non-uniform gap into a Fourier series:

$$B(\alpha) = \frac{\mu_0}{\delta_m} \cdot \lambda_0 \cdot F_{ml} \cdot \left(\cos(\alpha) - \frac{\lambda_1}{2 \cdot \lambda_0} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda_k}{2 \cdot \lambda_0} \cdot \cos(\alpha \cdot (k \pm 1)) - \frac{\lambda_k \cdot \lambda_1}{2 \lambda_0^2} \cdot \cos(k \alpha) \right) \right) \quad (7)$$

Based on this expression, harmonics of order $p \pm 1$ arise in the air gap due to the eccentricity, which rotate induct only with the rotor, caused by the components of the magnetic conductivity. When considering all the terms of the expansion $\Lambda(\alpha)$ expanding into a Fourier series, we obtain that in the air gap of the machine, harmonics with the number of pole pairs $p \pm k$ (where $k = 1, 2, 3 \dots$) and the order $\nu = 1 \pm k/p$ are present, caused by periodic changes in magnetic conductivity.

In Figure 5, the results of modeling the distribution of the magnetic field induction in the air gap at $\rho=1$ as a function of the geometric angle α are presented in the polar coordinate system for different numbers of series terms.

To calculate the magnetic field using the finite element method in the FEMM program, a model of the active part of the IM in its cross-section has been created. The physical-geometric model of the active part of the IM is presented in Figure 4. The algorithm for its formation and justification is described in detail in [3].

Numerical calculations of the magnetic field and determination of the necessary electromagnetic parameters were automated using a specially created script in the Lua programming language, integrated into the FEMM program, and presented in the polar coordinate system.

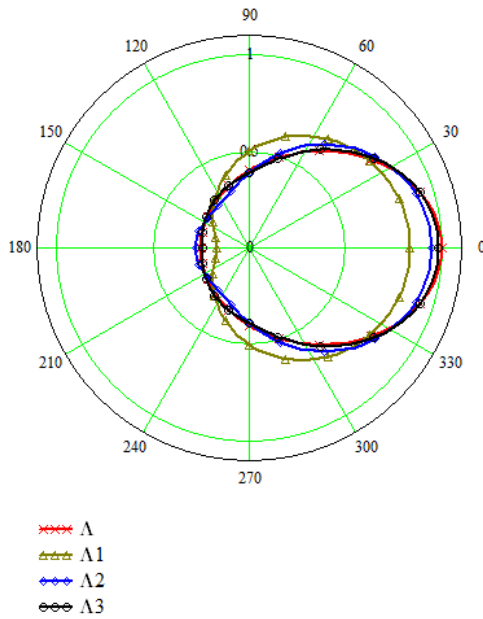


Figure 5. The dependence of the specific magnetic conductivity of the air gap on the geometric angle for different numbers of series terms

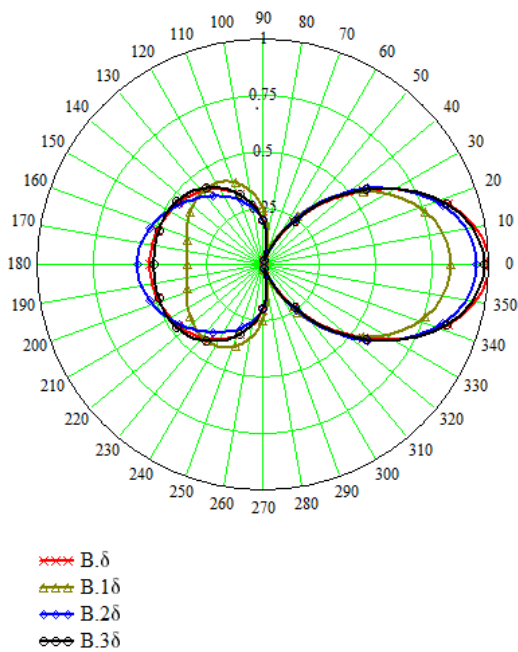


Figure 6. Distribution of magnetic field induction in the air gap at $\rho=1$ as a function of the geometric angle α in the polar coordinate system for various numbers of series terms

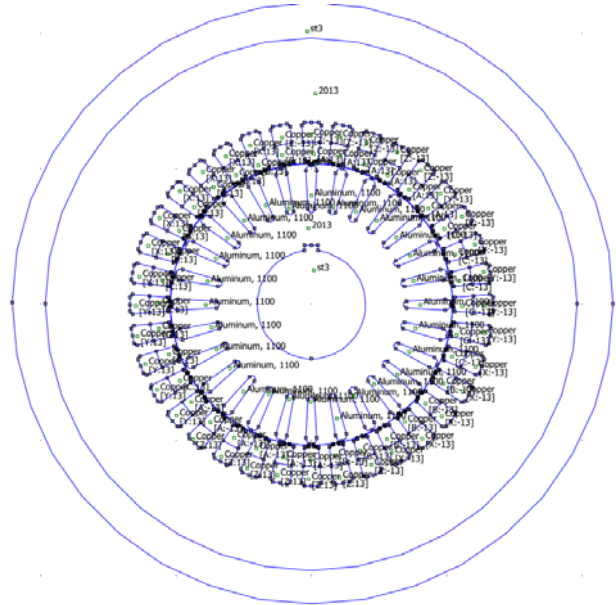


Figure 7. Physical-geometric model of the active part of the AC machine

The differential equation of the stationary magnetic field in the transverse cross-section in the polar coordinate system looks like this [6], [9], [19]:

$$\frac{I}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[v \cdot r \cdot \frac{\partial A_z}{\partial r} \right] + \frac{I}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[v \cdot \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} \right] = -J_z \quad (8)$$

where A_z , J_z - axial components of vector magnetic potential and vector current density μ specific magnetic resistance (determined by the magnetization curve of the material H (V).

During the calculation of the magnetic field propagation, it is limited to the outer surface of the stator core, where a Dirichlet boundary condition is specified:

$$A_z = 0 \quad (9)$$

A symmetrical three-phase system of phase currents is specified in the stator winding:

$$i_{sA} = I_{ms} \cdot \cos(\omega_s \cdot t) \quad (10)$$

$$i_{sB} = I_{ms} \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right) \quad (11)$$

$$i_{sC} = I_{ms} \cdot \cos\left(\omega_s \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right) \quad (12)$$

where t - time; I_{ms} - the amplitude of the current; $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$ - angular frequency.

At the initial moment when $t=0$ the currents in phase windings A, B are as follows:

$$i_{sA} = I_{ms} \quad (13)$$

$$i_{sB} = i_{sC} = -0.5 \cdot I_{ms} \quad (14)$$

A polyphase system of instantaneous current values in the bars of the short-circuited rotor is formed:

$$i_{rj} = \sqrt{2} \cdot I_r \cdot \sin(p \cdot [(j-1) \cdot \alpha_{rn} + \alpha_{sr} + \alpha_{r1}]) \quad (15)$$

where $k = 1, 2, \dots, Q_r$ – number of the slot; $I_{mr} = \sqrt{2} \cdot I_r$ – the amplitude of the phase currents of the rotor; a_{r1} – the coordinate of the first slot (on Figure 1 $a_{r1}=0$); $a_{rn} = 360^\circ / Q_r$ – the angle of mutual slot displacement.

The magnetic induction, calculated based on the distribution of the magnetic potential using the general expression:

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{k} \cdot A_z) \quad (16)$$

Its components in polar coordinates

$$B_r = \frac{\partial A_z}{r \partial a}; B_a = -\frac{\partial A_z}{\partial r} \quad (17)$$

From the numerical field calculation, we obtain the electromagnetic torque, which is determined through the Maxwell stress tensor:

$$\begin{aligned} M_{em} &= \frac{l_a}{(r_s - r_r)} \int_{S_\delta} r \cdot f_{T\alpha} dS = \\ &= \frac{l_a}{\mu_0 \cdot (r_s - r_r)} \int_0^{2\pi} \int_{r_r}^{r_s} r \cdot B_r \cdot B_a dr d\alpha \end{aligned} \quad (18)$$

where B_r and B_a – the radial and tangential components of the magnetic induction; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ – magnetic permeability; r_r and r_s – radii of the circles bounding the transverse area of the air gap S_δ from the rotor side and the stator side.

The investigation was conducted using an induction motor with a squirrel-cage rotor of type 4A225M2U3, with a power rating of 55 kW, and a number of pole pairs $p = 1$, the nominal voltage $U = 380 / 660 \text{ V}$, $\eta = 91\%$; $\cos(\varphi) = 0.92$.

Design parameters:

- the external diameter of the stator $D_a = 0.392 \text{ m}$;
- the external diameter of the rotor, $D_2 = 0.206 \text{ m}$;
- the shaft diameter, $D_j = 0.101 \text{ m}$;
- air gap between the rotor and the stator $\delta = 1 \text{ mm}$;
- the number of slots in the stator core $Z_1 = 36$;
- the number of slots in the rotor core $Z_2 = 28$.

Figure 7 shows the results of the calculation of the normal component of the magnetic field induction.

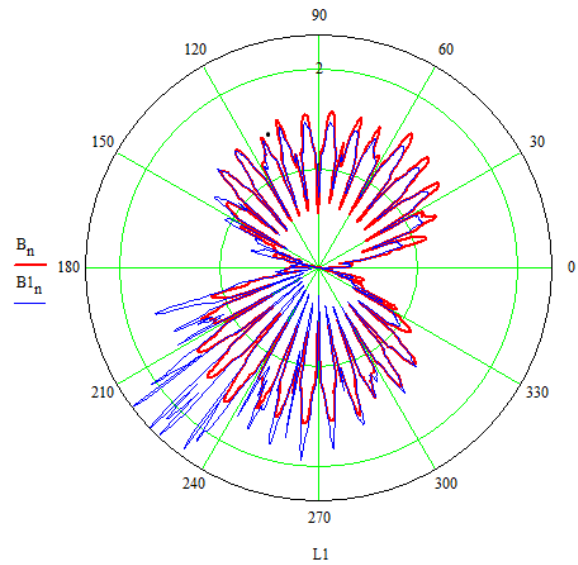


Figure 8. Results of the calculation of the normal component of the magnetic field induction using FEMM software in the polar coordinate system

As seen from Figure 7, under static eccentricity, the amplitude of the magnetic induction at a larger air gap of the motor is significantly lower than that at a smaller air gap, causing unidirectional magnetic pull of the motor; the direction of the magnetic pull aligns with the direction of increasing eccentricity.

Figure 8 shows the results of calculating the time function of the electromagnetic moment within the time interval $[0 - T]$, where T is a time period equal to the time of one complete rotation of the rotor.

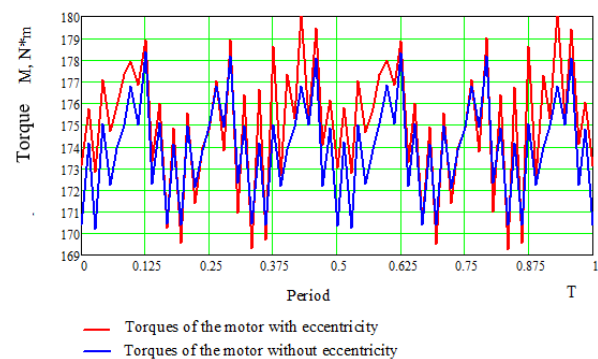


Figure 9. FEMM software calculation results

As seen from Figure 8, with static eccentricity, the amplitude of the electromagnetic torque increases.

A harmonic analysis of the field composition in the air gap of the electric machine has been performed, and the fundamental harmonic of induction as well as higher and lower order harmonics have been identified.

Based on the results of the magnetic field calculation using the post-processor of the program, a text file is generated. This file contains the measured values and the coordinates of the points of the contour where these measurements are taken. The distribution of the normal component of the induction in the air gap is important.

This text file is then read by a program that performs harmonic analysis.

Next, we use the MathCAD program, which has a built-in function FFT (Fast Fourier Transform).

The frequency spectrum of the induction in the air gap with and without eccentricity is presented in Figure 9.

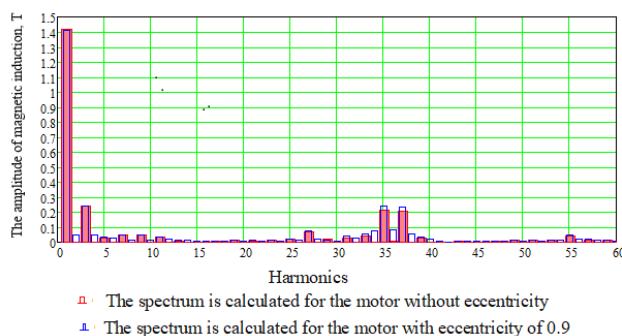


Figure 10. The harmonic composition of the induction in the air gap with the occurrence of eccentricity (blue) and without it (red)

As seen from Figure 10, with static eccentricity, a new order is added to the spectrum.

Therefore, the values of the harmonic orders found using the numerical field method are consistent with those found analytically and with data obtained from open sources [4] – [7], [20], [21].

V. CONCLUSIONS

1. The mathematical model of the two-pole squirrel-cage induction motor has been improved, allowing for more accurate modeling of electromagnetic processes at various values of static rotor eccentricity.

2. The mathematical model implemented in the FEMM package. The simulation results demonstrate that the developed mathematical model of the induction motor enables the detection of a diagnostic relationship between the diagnosed defect (static eccentricity) and the diagnostic feature (higher and lower order induction harmonics in the air gap).

3. In future works, the authors will be provided with the opportunity to improve the obtained mathematical model for modeling rotor eccentricity of an induction motor, taking into account the serration of the stator and rotor.

The timely detection of the presence and magnitude of rotor eccentricity will not only reduce energy consumption costs but also prevent damage to the induction motor.

REFERENCE

- [1] Vaskovskiy, Y.N., Geras'kin, A.A. (2014). Vibrational diagnostics of rotor eccentricity in asynchronous machines based on analysis of vibration forces. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 38 (1081). 52–62.
- [2] Wallin M., Bladh J., Lundin U. (2013). Damper winding influence on unbalanced magnetic pull in salient pole generators with rotor eccentricity. *IEEE transactions on magnetics*, 49, 9, 5158–5165. URL: <https://doi.org/10.1109/tmag.2013.2259633>
- [3] Novozhilov, A.N. (2013). Diagnostics of rotor eccentricity in alternating current electric machines using artificial neural networks. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 1, 68-75.
- [4] Geller, B., & Gamata, V. (1981). Higher harmonics in induction machines. *M. Energiya*, 351.
- [5] Novozhilov, A.N., & Isupova, N.A. (2013). Features of modeling the magnetic field in the air gap with rotor eccentricity of an induction motor. *Electrical Engineering*, 9, 30-33.
- [6] Milikh, V.I. (2018). Numerical-field analysis of the adequacy of design data for three-phase asynchronous motors and a method for their refinement based on this. *Technical Electrodynamics*, 1, 47–55. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.047>
- [7] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2017). Osobennosti trehmernogo modelirovaniya jelektromagnitnyh polej asinhronnogo dvigatelja [Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors]. *Elektrotehnika i elektroenergetika*, 2, 43-50. (in Russian) DOI:10.15588/1607-6761-2016-2-5
- [8] Chen H., Bi C. (2022). An effective method for determination and characteristic analysis of induction motor parameters. *IET electric power applications*. 16 (5), 605–615. URL: <https://doi.org/10.1049/elp2.12180>
- [9] Milikh, V.I. (2018). Automated system for forming calculation models of electric machines for the FEMM software environment. *Technical Electrodynamics*, 4, 74–78. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.074>
- [10] Thomson W. T. (1999). A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors-past present and future. Keynote address at IEEE symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives, 3-18.
- [11] Vigovsky, O.V. (2018). Diagnosis of induction motors of nuclear power plant units. *Problems of nuclear power plant safety and Chernobyl*, 36–40. URL: <https://doi.org/10.31717/1813-3584.18.31.4>
- [12] Lushchik, V.D., Polezin, S.Yu., & Antypko, G.S. (2013). Premature failure of windings in two-pole medium-power induction motors. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 6, 37-39.
- [13] Novozhilov, A.N., et al. (2013). Diagnosing rotor eccentricity of an induction motor based on the root-

- mean-square value of additional harmonic stator currents. *Technical Sciences - From Theory to Practice*, 27, 1.
- [14] Nikiyan, N.G. (2003). Multiphase real asynchronous machine: mathematical modeling, methods, and diagnostic tools: monograph
- [15] Petukhov, V.S. (2005). Diagnosis of the state of electric motors based on spectral analysis of consumed current. *Electrical Engineering News*, 31, 23–26.
- [16] Neelam Mehala (2010). Detecting of bearing faults of induction motor using Park's vector approach. *International Journal of Engineering and Technology*, 2. 263–266.
- [17] Zhou G.Y., Shen J.X. (2017). Rotor notching for electromagnetic noise reduction of induction motors. *IEEE transactions on industry applications*, 53(4), 3361–3370.
URL: <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2681969>
- [18] J. Du et al. (2021). Research on radial electromagnetic force and vibration response characteristics of squirrel-cage induction motor fed by PWM inverter. *IEEE transactions on applied super conductivity*, 31, (8). 1–4.
URL: <https://doi.org/10.1109/tasc.2021.3096501>
- [19] Gashimov, M.A., & Mirzoyeva, S.M. (2002). Investigation for the purpose of diagnosing electromagnetic processes in electrical machines with uneven air gap. *Electricity*, 11, 52-45.
- [20] Novozhilov, A.N., & Isupova, N.A. (2012). Investigation of methods for modeling air gap size with rotor eccentricity in an electric machine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 6, 23-28.
- [21] Yondem, M.E., Nikiyan, N.G., & Akopyan, G.S. (1985). Magnetic conductivity of the air gap of an induction machine with rotor eccentricity. *Electromechanics*, 5, 32-35.

УДК 621.341.572

ДО ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІНВЕРТОРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПІДВИЩЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПОТУЖНОСТІ

САВЕНКО О.С. канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації систем електропостачання та електроприводу ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна, e-mail: savenko.olja@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8108-2575;

Мета роботи. Розробка зварювального інвертора з корекцією коефіцієнта потужності, з невеликою собівартістю і низькими втратами енергії.

Методи дослідження. Запропоновано використати принцип прямого перетворення і розробити "гібридну" схему, що містить основний канал з безпосереднім перетворенням і допоміжний, який має перетворювач з проміжною ланкою постійного струму з невеликим запасом енергії. Оскільки навантаженням для зварювального джерела живлення є зварювальна дуга, миттєві коливання її потужності протягом періоду напруги мережі практично не впливають на процес зварювання через термічну постійну розплавленого металу зварювальної ванни. Ефективне використання особливостей навантаження джерел – зварювальної дуги – дозволяє оптимізувати силову частину, знизити запас енергії в реактивних елементах схеми і поліпшити економічні і масогабаритні параметри джерел.

Отримані результати. Проведений аналіз підходів до побудови інверторних зварювальних джерел з підвищеним коефіцієнтом потужності. Запропоновано нову топологію прямоходового інверторного зварювального джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності. На відміну від "класичних" схем з подвійним перетворенням енергії в розробленій схемі передбачена можливість живлення навантаження як безпосередньо від мережі, так і від накопичувача енергії, що є в джерелі. Наведений алгоритм розрахунку частоти перемикання силових ключів джерела, обчислення виконується в реальному часі за умови стабілізації амплітуди поточкозчеплення первинної обмотки трансформатора. Розглянута можливість використання інверторних джерел, виконаних за представленою топологією і працюючих з описаним алгоритмом керування, у трифазній мережі живлення. Для підтвердження адекватності розроблених положень створений експериментальний зразок джерела живлення. Отримані осцилограми напруги мережі та споживаного струму джерела при потужності в навантаженні близько 1 кВт та осцилограми в режимі обмеження вихідного струму. Проведені експерименти показали, що джерело має коефіцієнт потужності більше 0,94 у широкому діапазоні потужностей.

Наукова новизна. Розроблене джерело не містить додаткових силових компонентів індуктивного типу, має знижену ємність накопичувального конденсатора у ланці постійного струму та спрощену схему обмеження зарядного струму конденсатора. Напруга холостого ходу джерела має підвищене значення, що не залежить від напруги мережі, це дозволяє забезпечити легкий підпал дуги при ручному дуговому зварюванні.

Практична цінність. За рахунок підвищеного коефіцієнта потужності середньоквадратичний струм, що споживається від мережі, на 30 – 45 % нижче, ніж у "класичних" інверторних джерелах без коректора коефіцієнта потужності. Це дозволяє забезпечити роботу більшої кількості таких джерел при тому ж струмовому навантаженні мережі та/або забезпечити стабільну роботу в умовах "слабкої" мережі.

Ключові слова: коефіцієнт потужності; зварювання; зварювальний інвертор; джерело живлення; підпал дуги; стабілізація горіння дуги; напруга холостого ходу.

І. ВСТУП

На сьогоднішній день тенденція розвитку зварювальних джерел живлення полягає, в основному, у збільшенні ступеня взаємодії між зварювальною електричною дугою, розплавленим електродним металом та зварювальною ванною, сукупність яких є об'єктом управління, та джерелом живлення. Ця тенденція спрямована на підвищення якості формування зварного з'єднання. При цьому до джерел живлення для ручного дугового зварювання пред'являються додаткові вимоги, пов'язані з необхідністю забезпечення легкого збудження дуги та стабільності її горіння.

Ще однією важливою вимогою є усунення можливого "залипання" електрода на виріб під час запа-

лювання дуги. В даний час також розвиваються способи керування перенесенням електродного металу за рахунок джерела живлення (наприклад, технології STT, STT2, реалізовані у професійних інверторах зварювальних фірми LincolnElectric).

При цьому практично не торкаються питання впливу зварювальних джерел живлення на електричну мережу, якості електроенергії на якість зварювання (характерної для джерел бюджетної цінової категорії), у т. ч. через їх джерела взаємного впливу. У зв'язку з цим в умовах запровадження стандартів електромагнітної сумісності (ЕМС) технічних засобів, стабільного підвищення цін на енергоносії, актуальним стає завдання забезпечення ЕМС зварювального обладнання з мережею, підвищення його енергоефективно-

сті та техніко-економічних показників.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Одним із шляхів підвищення енергоефективності та покращення масогабаритних показників зварювальних джерел та систем індукційного нагріву є використання принципу перетворення енергії на високій частоті [1]-[4]. Такі (тобто інверторні) джерела характеризуються зниженою масою та габаритами (до 70 %, згідно [5]-[6]), мають менші втрати електроенергії, підвищену швидкість та широкий діапазон регулювання вихідних параметрів. З іншого боку, інверторні джерела характеризуються зниженим коефіцієнтом потужності та є джерелами перешкод на частотах вищих гармонік [7]-[9]. Відповідно до наведених у роботі [10]-[14] даних, електрозварювальне обладнання становить близько 65% потенційних джерел електромагнітних перешкод [5]. За даними [15], під час роботи зварювальних інверторів можлива поява в мережі резонансів на частотах вищих гармонік, при цьому амплітуда перенапруг може досягати 800 В. Таким чином, зварювальні джерела некоректно відносити до енергозберігаючого обладнання [7], [15].

Значні спотворення форми кривої споживаного струму у більшості поширених джерел пояснюються будовою перетворювача змінної мережі напруги в постійну. Найчастіше цей перетворювач є діодний міст зі згладжуючим конденсатором великої ємності (кілька тисяч мікрофарад) на виході.

Таким чином, переважна більшість наявних на ринку зварювальних інверторів не мають корекції коефіцієнта потужності і не задовольняють вимог стандартів EMC технічних засобів (ДСТУ ІЕС 60974-10:2007, ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004, ДСТУ EN 61:2014) у всьому можливому діапазоні режимів роботи.

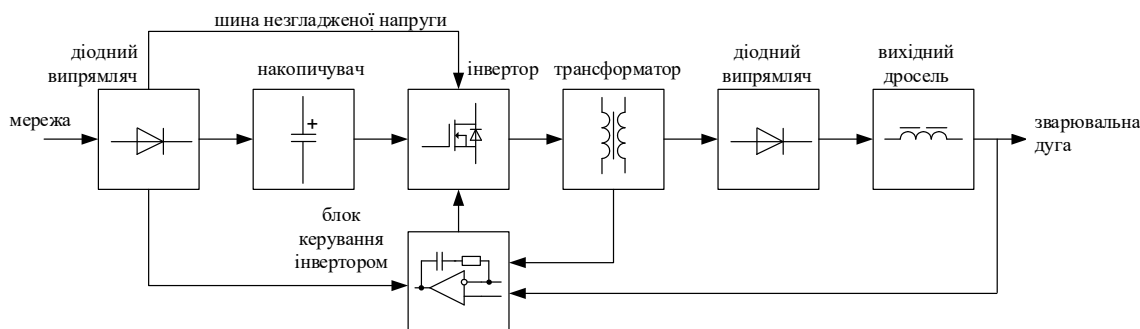


Рисунок 1. Структурна схема розробленого зварювального інверторного джерела

При зазначеній побудові джерела потужність його навантаження змінюватиметься з подвоєною частотою мережі. Більше того, двічі протягом періоду мережі вихідна потужність джерела наближається до нуля, що призводить до згасання дуги та деіонізації дугового проміжку. Для виключення такого розвитку подій і служить накопичувач енергії у джерелі: при переході напруги мережі через нуль підтримка горін-

ня дуги здійснюється за рахунок переведення інвертора на живлення від накопичувача та зниження його потужності до рівня "чергової" дуги. Невелика потужність "чергової" дуги дозволяє значно знизити запас енергії в накопичувачі, покращивши тим самим техніко-економічні параметри джерела. Пульсації вихідної потужності з подвоєною частотою мережі не становлять проблему для якості зварного шва, оскільки зварювальна ванна має теплову інерційність і виступає в

III. МЕТА РОБОТИ

Розробка інверторних джерел з підвищеним коефіцієнтом потужності, що наближаються за характеристиками до професійних, але мають значно меншу собівартість.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розроблено схемне рішення однофазного зварювального інверторного джерела із прямим перетворенням [7, 16]. На відміну від "класичних" схем з подвійним перетворенням енергії у розробленій схемі передбачена можливість живлення навантаження (дуги) як безпосередньо від мережі, так і від наявного джерела накопичувача енергії. Накопичувач має невеликий запас енергії і призначений тільки для стабілізації горіння дуги, а також для полегшення процесу її початкового підпалу.

Структурна схема розробленого джерела наведена на рисунку 1. Інвертор може працювати як від шин накопичувача енергії, так і від шини випрямленої, але не згладженої напруги мережі. Саме ця особливість дозволяє керувати формою струму, що споживається з мережі, за рахунок швидкодіючого управління потужністю інвертора.

ролі згладжуючого фільтру нижніх частот.

Принципову електричну схему силової частини джерела наведено на рисунку 2. Джерело складається з вхідного випрямляча на діодному мосту BR1, ємнісного накопичувача C3, модифікованого прямоходового перетворювача на елементах VT1 – VT3, VD1, VD3, VD4, навантаженого на високочастотний силовий трансформатор T1, до вторинної обмотки якого

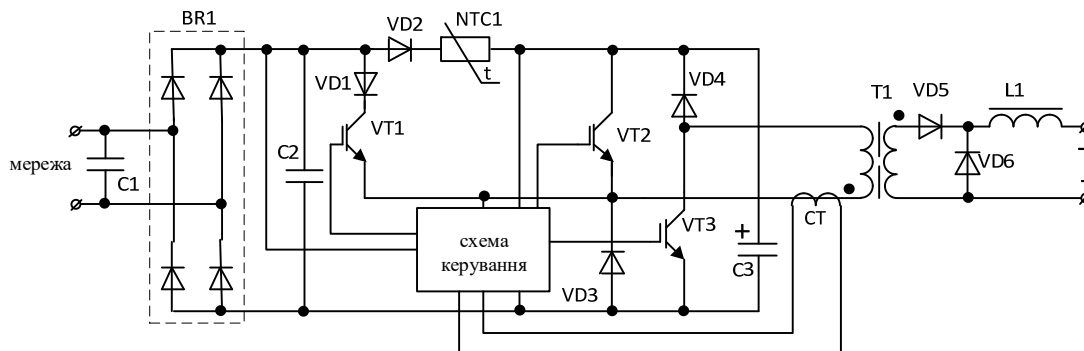


Рисунок 2. Принципова електрична схема силової частини розробленого джерела

Модифікований прямоходовий перетворювач побудований таким чином, що на первинну обмотку T1 можна подати як незгладжену напругу мережі (за рахунок включення VT1 і VT3), так і напругу з ємнісного накопичувача C3 (при відкритті VT2 і VT3). При цьому на зворотному ході силового трансформатора (розмагнічуванні) скидання енергії магнітного поля йде в конденсатор C3 (струм при цьому протікає через діоди VD3 і VD4). У вторинному колі процеси протікають так само, як і в "класичному" прямоходовому перетворювачі. При відкритті пари VT1-VT2 або пари VT2-VT3 (прямий хід) діод VD5 у вторинному колі відкривається і йде процес передачі енергії в навантаження з "накачуванням" вихідного згладжуючого дроселя L1. Струм первинної обмотки T1 при цьому дорівнює приведену вихідному струму (тобто струму навантаження).

На зворотному ході полярність напруги на вторинній обмотці T1 змінюється на протилежну, відкривається діод VD6 і навантаження живлення здійснюється за рахунок енергії, запасеної в L1.

За рахунок можливості живлення навантаження безпосередньо від мережі (незгладженою напругою) з'являється можливість управління формою струму, що споживається від мережі. Це використано для зниження рівня вищих гармонік у споживаному струмі розробленого джерела та підвищення його коефіцієнта потужності.

Оскільки навантаження джерела (зварювальна дуга) відрізняється нестабільністю параметрів, управління локальним середнім (тобто середнім за період перемикання ключів) струмом, що споживається, виконано шляхом обчислення заряду, що пройшов через первинну обмотку силового трансформатора на пря-

підключений вихідний дросель L1. Коло VD2, NTC1 служить обмеження зарядного струму C3 при включенні джерела в мережу. Для запропонованої топології джерела ємність C3 відносно невелика (сотні мкФ), що дозволило виконати схему початкового заряду на термісторі. Проникнення високочастотних перешкод у мережу під час роботи джерела знижують блокувальні конденсатори C1 і C2.

мому ходу. Сигнал, пропорційний цьому заряду, формується шляхом інтегрування вторинного струму трансформатора CT (рис. 2), включеного в коло первинної обмотки силового трансформатора T1 джерела, що розглядається. Така побудова системи керування дозволяє практично повністю виключити вплив пульсацій вихідного струму джерела на якість формування вхідного струму, що споживається від мережі [7].

Так як енергія магнітного поля T1 на зворотному ході скидається в накопичувач C3, це дозволяє стабілізувати напругу на конденсаторі на рівні, що дещо перевищує амплітуду напруги мережі. Це дає можливість стабілізувати напругу холостого ходу джерела та полегшити підпал дуги навіть за зниженої напруги мережі.

Для експериментального підтвердження викладених положень створено дослідне джерело з вихідним струмом до 160 А. Конденсатори C1 – 6,8 мкФ×630 В, C2 – 0,1 мкФ×400 В, C3 – 330 мкФ×450 В. Діодний міст BR1 типу GBJ5010, діоди VD1, VD3, VD4 – 30ETH06, VD2 – FR307, VD5, VD6 – 150EBU02. Транзистори VT1, VT3 – FGH40N60SFD, VT2 – IRG4PC50W, термістор NTC1 – MF72-3D15. Трансформатор T1 виконаний на осерді ETD59/31/22 з немагнітним зазором 1,4 мм, має коефіцієнт трансформації 28/9, індуктивність первинної обмотки 320 мкГн. Дросель L1 має індуктивність 30 мкГн при струмі 100 А. Живлення ланцюгів управління здійснюється від малопотужного зворотногоходового перетворювача, що живиться від конденсатора C3 та виконаного на мікросхемі TNY255P. Формування сигналів керування затворами IGBT здійснюється однокристальним мікроконтролером STM32F030F4P6, який працює зі спеціалізованими

драйверами FOD3184.

Система управління джерелом забезпечує стабілізацію напруги на конденсаторі С3, формування вхідного (мережевого) струму джерела пропорційно миттєвій напрузі мережі, формування заданої зовнішньої ВАХ джерела і захист силових ключів від аварійних надструмів. Стабілізація напруги на С3 здійснюється за рахунок керування прямим ходом джерела. Енергія, що запасена у полі Т1, на зворотному ході завжди скидається в С3, збільшуючи напругу на ньому. Але прямий хід джерела можливий як від С3 (при відкритті VT2, VT3), так і від випрямленої напруги мережі (при відкритті VT1, VT3). У першому випадку С3 розряджається на первинну обмотку Т1, у другому – не бере участі у роботі. Регулюючи тривалість прямого ходу від С3, можливе керування запасом енергії в ньому та стабілізація напруги.

Формування вхідного струму джерела та забезпечення його пропорційності напрузі мережі здійснено за рахунок управління зарядом, що пройшов на прямому ході через первинну обмотку Т1 при відкритих VT1 та VT3. Величина цього заряду встановлюється пропорційно добутку періоду перемикання ключів, миттєвої вхідної напруги та коефіцієнта, пропорційного вихідної потужності джерела (провідність, що імітується). Як було сказано вище, такий підхід також дозволяє усунути вплив пульсацій струму навантаження на якість керування струмом мережі.

Задана зовнішня ВАХ джерела формується за рахунок керування його вихідною потужністю. При цьому імітована провідність не змінюється протягом періоду мережі, інакше неминучі спотворення форми споживаного струму. Зміна потужності джерела відбувається у моменти переходу напруги через нуль. Більш того, для зниження впливу коливань напруги мережі на вихідну ВАХ джерела, зазначений коефіцієнт (імітована провідність) розраховується з корекцією по дієвій напрузі мережі, що була виміряна.

Для максимального використання магнітопроводу силового трансформатора частота перемикання силових ключів джерела не фіксована і обчислюється в реальному часі за умови стабілізації амплітуди потоку зчеплення первинної обмотки трансформатора. Змінна частота дозволяє знизити динамічні втрати потужності в силових ключах, збільшити максимальну потужність джерела через послаблення впливу індуктивності розсіювання силового трансформатора, а також знизити спектральну щільність електромагнітних перешкод, що генеруються, завдяки розподілу їх енергії по більшому діапазону частот. В експериментальному джерелі частота перемикання силових ключів змінюється у діапазоні 15 – 63 кГц.

У керуючій програмі мікроконтролера реалізовано наступний алгоритм (наведені нижче обчислення виконуються для кожного періоду перемикання):

– вимірюються напруги на конденсаторах С1 (u_{C1}) та С3 (u_{C3});

– обчислюється максимальний час намагнічування відповідно до виразу:

$$t_M = \frac{\Psi_M}{u_{C3}},$$

де Ψ_M – максимальне потікозчеплення первинної обмотки, Вб (у дослідному джерелі воно становить $3,1 \cdot 10^{-3}$ Вб);

– обчислюється тривалість прямого ходу від конденсатора С3:

$$t_1 = t_M \frac{u_{C3} - u_{C3min}}{u_{C3max} - u_{C3min}},$$

де u_{C3max} та u_{C3min} – встановлені максимальна та мінімальна напруга на конденсаторі С3 (у джерелі $u_{C3max} = 380$ В, $u_{C3min} = 320$ В). Розраховане значення t_1 обмежується діапазоном $[0; t_M]$. Це дозволяє підтримувати напругу на конденсаторі С3 під час роботи джерела в діапазоні 320 - 380 за допомогою управління "скиданням" енергії з С3 шляхом синхронного відкриття ключів VT2 і VT3;

– обчислюється максимальна тривалість t_2 прямого ходу від конденсатора С1:

$$t_2 = \frac{\Psi_M - u_{C3} \cdot t_1}{u_{C1}} + t_1,$$

результат обмежується діапазоном $[0; t_{2max}]$, де t_{2max} – встановлений максимальний час прямого ходу (у джерелі $t_{2max} = 67$ мкс);

– обчислюється тривалість періоду перемикання:

$$T = t_2 + t_M;$$

– обчислюється опорний заряд:

$$q^* = u_{C1} \cdot G \cdot T,$$

де G – імітована провідність, См. Її зміною здійснюється керування вихідною потужністю джерела.

Після виконання зазначених обчислень програмуються регістри апаратного таймера мікроконтролера і починається робочий цикл.

Спочатку на час t_1 включаються ключі VT2, VT3. Потім VT2 закривається, відкривається VT1 і дозволяється робота інтегратора первинного струму силового трансформатора. Закриття ключів (початок зворотного ходу) відбувається або після часу t_2 (характерно при малому навантаженні або режимі холостого ходу), або по досягненню інтегралом первинного струму значення опорного заряду q^* (характерно при роботі під навантаженням). Саме наявність зворотного зв'язку по інтегралу струму первинної обмотки Т1 за час відкритого стану ключів VT1, VT3 забезпечує пропорційність споживаного від мережі струму миттєвій напрузі. Інтегрування проводиться в аналоговому вигляді, шляхом підключення попереднього розрядженого конденсатора до вторинної обмотки трансформатора струму, первинна обмотка якого включена послідовно з первинною обмоткою силового трансформатора Т1. Сигнал закінчення прямого

ходу формується компаратором, що порівнює напругу на зазначеному конденсаторі з напругою уставки, що пропорційна опорному заряду q^* . При цьому максимальна тривалість прямого ходу розраховується в реальному часі за умови недопущення насичення Т1.

Діаграма напруги на первинній обмотці трансформатора під час роботи джерела має вигляд, що наведений на рис. 3.

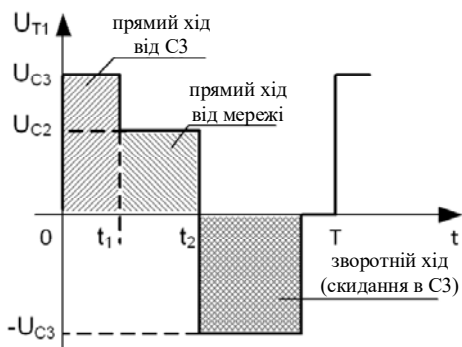


Рисунок 3. Діаграма напруги на первинній обмотці трансформатора під час роботи джерела

У схемі також передбачено швидкодіючий аварійний захист силових ключів з фіксованою уставкою по струму. Вона забезпечує обмеження струму при малій вихідній напрузі, в т.ч. при короткому замиканні виходу джерела.

Статична вихідна ВАХ описаного джерела в робочій частині є гіперболічною (з постійною потужністю). Це призводить до стабілізації теплової потужності дуги, природним образом реалізується форсаж дуги (підвищення струму при зниженні напруги, функція "ArcForce"). Напруга підпалу дуги виготовленого джерела становить 110 - 120 В і не залежить від напруги мережі живлення.

Випробування джерела показали, що він має коефіцієнт потужності понад 0,94 у широкому діапазоні потужностей. Завдяки цьому середньоквадратичний струм, що споживається від мережі, на 30 – 45 % нижче, ніж у "класичних" інверторних джерел без коректора коефіцієнта потужності. Так, на рис. 4 наведені осцилограми напруги мережі та споживаного струму джерела при потужності в навантаженні близько 1 кВт, а на рис. 5 – осцилограми у режимі обмеження вихідного струму. Навіть у цьому випадку коефіцієнт потужності джерела залишається не нижче 0,9.

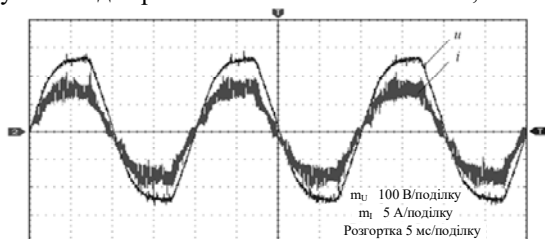


Рисунок 4. Осцилограми напруги мережі та споживаного струму джерела

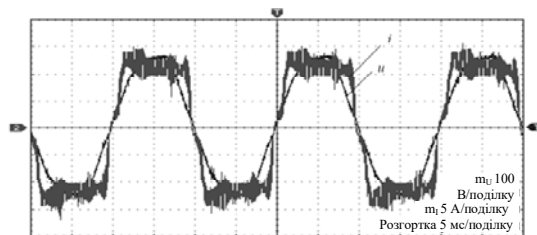


Рисунок 5. Осцилограми напруги мережі та споживаного струму джерела в режимі обмеження вихідного струму

У джерелі реалізовано функцію "антизалипання", тобто зменшення вихідного струму при малій напрузі на виході (тобто при замиканні зварювального електрода на виріб). При цьому вимірювання вихідної напруги здійснено опосередковано, шляхом програмної оцінки тривалості прямого ходу, напруги мережі та напруги на конденсаторі С3. Такий підхід виключає необхідність введення додаткових компонентів у схему джерела. Також можливе програмне зменшення напруги холостого ходу джерела під час простою, що дозволить підвищити безпеку зварювальних робіт.

Зварювальні інверторні джерела, виконані за представленою топологією і працюючі з описаним алгоритмом керування, допускають паралельну роботу. У зв'язку з цим інтерес представляє паралельне з'єднання виходів трьох джерел, підключених до трьох фаз живильної мережі. У цьому випадку пульсації миттєвих вихідних потужностей джерел взаємно компенсуються і загальна потужність системи стає постійною величиною. Більше того, можлива робота системи з трьох джерел, з'єднаних у "зірку" без нульового дроту з автоматичним симетруванням напруги на входах джерел. Це дає можливість роботи з трипровідним підключенням до промислової мережі 0,4 кВ. Крім цього, паралельне з'єднання джерел може використовуватися для підвищення надійності живлення зварювального процесу (звісно, за наявності запасу за потужністю).

V. ВИСНОВКИ

1. Розроблено зварювальне інверторне джерело з підвищеним коефіцієнтом потужності, яке відрізняється: зниженою ємністю конденсатора ланцюга постійного струму та спрощеною схемою обмеження його зарядного струму; підвищеною та стабілізованою напругою холостого ходу; відсутністю додаткових силових індуктивних компонентів, притаманних ККП. Представлене схемне рішення дозволяє створювати зварювальні інверторні джерела, що наближаються за характеристиками до професійних, але мають значно меншу вартість та масогабаритні характеристики.

2. Застосування пропонованого інверторного джерела живлення для зварювання дозволяє зменшити втрати електроенергії в розподільній мережі за рахунок зниження дієвого значення споживаного стру-

му, і підвищити якість напруги мережі за рахунок зниження коефіцієнта гармонік. Завдяки меншому споживаному струму джерел з підвищеним коефіцієнтом потужності можлива одночасна робота більшого їх числа при тій же потужності мережі, що дає можливість підвищити продуктивність зварювальних робіт, особливо в монтажних умовах при значному видаленні зварювального посту від джерела енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Development of converter for high frequency welding machines using active snubber / J.-Y. Shin, J.-M. Lee, S.-W. Choi, J.-Y. Lee // The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics. – 2016. – № 21. – Pp. 351-355. DOI: 10.6113/TKPE.2016.21.4.351.
- [2] Electronic welder with high-frequency resonant inverter / L. Malesani, P. Mattavelli, L. Rossetto [et al.] // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting. – 1993. – Vol. 2. – Pp. 1073-1080.
- [3] Digital Control of High-Frequency Switched-Mode Power Converters / L. Corradini, D. Maksimovič, P. Mattavelli, R. Zane. – Wiley-IEEE Press. – 1st edition, 2015. – 368 p.
- [4] Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect / V.V. Kukhar, A.G. Prysiashnyi, E.Yu. Balalayeva, O.S. Anishchenko // Modern Electrical and Energy System MEES'2017 (15-17 November 2017; Kremenchuk). – Kremenchuk, 2017. – Pp. 404-407. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248945.
- [5] Galvery W.L. Welding essentials: questions&answers / W.L. Galvery, F.M. Marlow. – Industrial Press, 2006. – 469 p.
- [6] Davies A.C. The Science and Practice of Welding / A.C. Davies. Vol. 1. – Cambridge University Press, 1993. – 350 p. DOI: 10.1017/CBO9780511470974.
- [7] Development of single-phase high-power factor inverter welding sources / V.V. Burlaka, E.V. Lavrova, S.K. Podnebennaya, I.V. Zakharova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, № 1 (88). – Pp. 18-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106957.
- [8] Baggini A. Handbook of Power Quality / A. Baggini. – John Wiley & Sons, Ltd., 2008. – 642 p. DOI: 10.1002/9780470754245.
- [9] Towards a better understanding of harmonics and power electronics – new measurement results and analysis methods for modern large-scale inverters / S. Rogalla, F. Ackermann, N. Bihler [et al.] // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15) La Coruña (Spain). – 2015. – No. 13. – Pp. 483-488. DOI: 10.24084/repqj13.368.
- [10] Zhao Y. Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications / Y. Zhao, W. Yan, J. Sun. – Springer Verlag, Singapore, 2022. – 232 p.
- [11] Electromagnetic compatibility of power supplies for arc welding / K. Skrzyniecki, P. Cegielski, A. Kolasa, A. Krajewski // Welding International. – 2011. – Vol. 27. – Pp. 1-6. DOI: 10.1080/09507116.2011.606149.
- [12] Electromagnetic compatibility of resistance welding machines - Part 1: Initial situation and measuring methodology / H. Mecke, R. Doebbelin, T. Winkler [et al.]. – 2002 – Vol. 54. – Pp. 152-156.
- [13] Podnebennaya S.K. On the problem of providing electromagnetic compatibility of power sources of resistance welding machines with electric mains / S.K. Podnebennaya, V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // The Paton Welding Journal. – 2016. – № 12. – Pp. 50-54. DOI: 10.15407/tpwj2016.12.09
- [14] Safronov P.S. Improvement of electromagnetic compatibility of power sources for resistance welding systems / P.S. Safronov, Yu.V. Bondarenko, O.F. Bondarenko // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – Vol. 5. – Pp. 89-91.
- [15] Rymar S. Effect of Single-Phase Power Sources of Welding Arc on Electric Mains / S. Rymar, A. Zher-nosekov, V. Sydorets // The Paton Welding Journal. – 2011. – Vol. 12. – Pp. 7-12.
- [16] Burlaka V.V. Forward inverter source with increased power factor / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.K. Podnebennaya // The Paton Welding Journal. – 2017. – №3. – Pp. 49-51. DOI: 10.15407/tpwj2017.03.08.

Стаття надійшла до редакції 10.01.2024

TO THE QUESTION OF CONSTRUCTION OF WELDING INVERTER SOURCES WITH A HIGH POWER FACTOR

SAVENKO O.S.

Ph.D, Associate professor of the automation of power supply and electric drive systems department of the SHEE "Priazovskiy state technical university", Dnipro, Ukraine, e-mail: savenko.olja@gmail.com. ORCID: 0000-0002-8108-2575;

Purpose. Design a power-factor-corrected, energy- and cost-efficient switchmode power supply for welding.

Methodology. It is proposed to use the principle of direct conversion and to develop the "hybrid" power circuit consisting of a main power path using direct conversion and an auxiliary power path having a converter with an intermediate DC link with relatively low stored energy. Since a load to the welding power supply is the welding arc, its instantaneous power fluctuations during the mains voltage period essentially do not influence the welding process due to

the thermal constant of the weld pool molten metal. Effective use of this features of the welding arc allows to optimize the power processing, reduce the amount of energy stored in the reactive elements of the circuit and improve the economical, mass and dimensional parameters of the supplies.

Findings. A new power factor corrected switchmode power supply topology is proposed utilizing beforementioned principles of power processing. The algorithm for calculating the switching frequency of supply power switches is given. To confirm the adequacy of the developed provisions, an experimental sample of the power supply was created. Oscillograms of mains voltage and source current consumption and oscillograms in output current limitation mode are obtained. The results of experiments showed that the supply has a power factor > 0.94 in a wide range of powers.

Originality. A distinctive feature of the supply is the absence of additional inductive components in the power path, a lower capacitance of the DC-link bulk capacitor and a simplified scheme for limiting its inrush current during initial charging. The supply has an increased open circuit voltage, independent of the mains voltage, which allows for easy arc ignition during manual arc welding.

Practical value. Due to the increased power factor, the current drawn from the mains is 30 % to 45 % lower than that of widespread inverter supplies without a power factor corrector. These features allow to simultaneously use more power supply units with the same mains current load, and/or to provide stable welding in conditions of a "weak" mains.

Keywords: power factor; welding; welding inverter; power supply; arc ignition; arc burning stabilization; open circuit voltage.

REFERENCES

- [1] Shin, J.-Y., Lee, J.-M., Choi, S.-W., & Lee, J.-Y. (2016). Development of converter for high frequency welding machines using active snubber. *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, 21, 351–355. <https://doi.org/10.6113/TKPE.2016.21.4.351>.
- [2] Malesani, L., Mattavelli, P., Rossetto, L., Tenti, P., Marin, W., & Pollmann, A. (1993). Electronic welder with high-frequency resonant inverter. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*, 2, 1073-1080.
- [3] Corradini, L., Maksimovič, D., Mattavelli, P., & Zane, R. (2015). *Digital Control of High-Frequency Switched-Mode Power Converters*. Wiley-IEEE Press.
- [4] Kukhar, V. V., Prysiazhnyi, A. G., Balalayeva, E. Yu., & Anishchenko, O. S. (2017). Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect. *Proceedings of Modern Electrical and Energy System MEES'2017*, 404-407. <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>.
- [5] Galvery, W. L., & Marlow, F.M. (2006). *Welding essentials: questions&answers*. Industrial Press.
- [6] Davies, A. C. (1993). *The Science and Practice of Welding*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511470974>.
- [7] Burlaka, V. V., Lavrova, E. V., Podnebennaya, S. K., & Zakharova, I. V. (2017). Development of single-phase high-power factor inverter welding sources. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1), 18-24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.106957>.
- [8] Baghini, A. (2008). *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470754245>.
- [9] Rogalla, S., Ackermann, F., Bihler, N., Dötter, G., Singer, R., & Wolf, E. (2015). Towards a better understanding of harmonics and power electronics – new measurement results and analysis methods for modern large-scale inverters. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'15) La Coruña (Spain)*, 13, 483-488. <https://doi.org/10.24084/repqj13.368>.
- [10] Zhao, Y., Yan, W., & Sun, J. (2022). *Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications*. Springer Verlag.
- [11] Skrzyniecki, K., Cegielski, P., Kolasa, A., & Krajewski, A. (2011). Electromagnetic compatibility of power supplies for arc welding. *Welding International*, 27, 1-6. <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.606149>.
- [12] Mecke, H., Doebbelin, R., Winkler, T., Winkler, R., & Gärtner, U. (2002). Electromagnetic compatibility of resistance welding machines - Part 1: Initial situation and measuring methodology, 54, 152-156.
- [13] Podnebennaya, S.K., Burlaka, V.V., & Gulakov, S.V. (2016). On the problem of providing electromagnetic compatibility of power sources of resistance welding machines with electric mains. *The Paton Welding Journal*, 12, 50-54. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.12.09>
- [14] Safronov, P.S., Bondarenko, Yu.V., & Bondarenko, O.F. (2014). Improvement of electromagnetic compatibility of power sources for resistance welding systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 5, 89-91.
- [15] Rymar, S., Zhernosekov, A., & Sydorets, V. (2011). Effect of Single-Phase Power Sources of Welding Arc on Electric Mains. *The Paton Welding Journal*, 12, 7-12.
- [16] Burlaka, V.V., Gulakov, S.V., & Podnebennaya, S.K. (2017). Forward inverter source with increased power factor. *The Paton Welding Journal*, 3, 49-51. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.08>.

УДК 621.31

ЗЕЛЕНА ЕНЕРГЕТИКА ЯК КЛЮЧОВИЙ ЕЛЕМЕНТ ВПРОВАДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

- ДАНИЛЬЧЕНКО Д.О.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: dmytro.danylchenko@khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7912-1849;
- ФЕДОРЧУК С.О.** канд. техн. наук, старший викладач кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: stanislav.fedorchuk@khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7676-8313;
- ПОТРИВАЙ А.Е.** аспірант кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: andrii.potryvai@ieec.khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1250-7525;
- МІНАКОВА К.О.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: kseniia.minakova@khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8869-1082;
- ПЕТРОВ С.О.** канд. техн. наук, доцент, професор кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: serhii.petrov@khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6500-5310;
- ПЕТРОВА Ю.В.** PhD, старший викладач кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: yuliia.petrova@khpri.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8184-906X;

Мета роботи. Метою цієї статті є вивчення ролі "Зеленої енергетики" у концепції розподіленої генерації, аналіз внеску відновлюваних джерел у стабільність енергетики. Основні завдання включають удосконалення моделей фотоелектричних панелей і вітрогенераторів для досягнення екологічної та економічної ефективності.

Методи дослідження. Математичне моделювання фотоелектричних панелей та вітрогенераторів, аналіз впливу уточнюючого коефіцієнта та коефіцієнта корисної дії інвертору на електрогенерацію. Використовується порівняльний аналіз отриманих результатів з реальними даними для валідації моделей. Досліджуються аеродинамічні характеристики вітрогенератора та вплив на вихідну потужність. Розробляється оптимізована модель для прогнозування ефективності гібридних систем з використанням зелених технологій.

Отримані результати. Отримані результати дослідження розкривають ключовий внесок "Зеленої енергетики" у концепцію розподіленої генерації. Методи математичного моделювання фотоелектричних панелей та вітрогенераторів, разом із застосуванням уточнюючого коефіцієнта та врахуванням ККД інвертору, дозволили покращити точність прогнозування електрогенерації. Розроблена модель враховує аеродинамічні характеристики вітрогенератора, підкреслюючи реалізовану можливість перевищення номінальної потужності відповідно до реальної характеристики. Отримані результати порівнюються з реальними даними для валідації та підтвердження ефективності систем.

Наукова новизна. Полягає в удосконаленні моделі комбінованої генерації фотоелектричних панелей та вітрогенератору, шляхом уточненого врахування роботи інвертору. Також було отримано дані по потенціалу застосування гібридної станції в обраному регіоні та доведено її переваги над застосуванням окремо СЕС та ВЕС.

Практична цінність. Полягає в оптимізації прогнозування електрогенерації в гібридних системах, що визначено підвищенням точності та адаптованістю до реальних умов. Дослідження виявляє потенціал для розвитку "Зеленої енергетики" в громадах з великою площею та середньою потужністю.

Ключові слова: зелена енергетика; розподілена генерація; математичне моделювання; фотоелектричні панелі; вітрогенератори; електрогенерація; гібридні системи.

I. ВСТУП

Період військових дій показав, що концентрація великих потужностей в одному місці є ласою цілью для терористичних атак, оскільки вихід з ладу потуж-

ної підстанції чи електростанції призведе до відключення від електроенергії великої кількості споживачів та може призвести до аварій всієї енергосистеми.

Відхід від централізованої системи електропос-

тачання до розподіленої генерації стає все більш актуальним. Це пов'язано з розвитком відновлювальних (зелених) джерел енергії (ВДЕ), вартістю побудови централізованої системи електропостачання, що зазвичай дорівнює вартості встановлення ВДЕ, відсутність ризиків пов'язаних з терористичними атаками на інфраструктуру централізованої системи електропостачання.

На сьогоднішній момент, для встановлення великої кількості ВДЕ потрібні значні площі, то впровадження такої концепції доречно розпочати з громад які мають значні площі та середню та малу потужності, що споживаються самими громадами.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Зелена енергетика - це напрямок енергетики, який передбачає використання відновлюваних джерел енергії, енергоефективності, рекуперації та екологічності. Україна має ряд стратегій, підходів та документів, які спрямовані на підтримку та розвиток зеленої енергетики, таких як:

- проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року [1], який презентовано Міністерством енергетики та захисту довкілля України у січні 2020 ро. Цей документ визначає національну ціль з енергоефективності, частку відновлюваних джерел енергії, зменшення видобувних галузей та вугільних ТЕС, перехід до кругової економіки та інтеграцію енергетичних ринків України з європейськими;

- Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року [2], який затверджено Кабінетом Міністрів України у грудні 2021 року. Цей документ встановлює національну ціль з енергоефективності до 2030 року, а саме: первинне та кінцеве споживання енергії в Україні у 2030 році не повинне перевищувати відповідно 91 468 тис. та 50 446 тис. тонн нафтового еквіваленту. Також Національним планом встановлюються та описуються низка горизонтальних та секторальних заходів щодо досягнення зазначеної мети (в сферах житлових та бюджетних будівель, транспорту, промисловості, енергетики);

- огляд Стратегії енергетичної безпеки України від Європейсько-Українського Енергетичного Агентства (ЄУЕА) [3], який опубліковано у лютому 2020 року. Цей документ аналізує сильні та слабкі сторони, можливості та загрози для енергетичної безпеки України, а також надає рекомендації щодо забезпечення стабільності, надійності, доступності та сталості енергетичного сектору України.

У світі існує багато стратегій, підходів та документів, що підтримують та розвивають "зелені" технології. Одним з найважливіших є Цілі сталого розвитку (ЦСР), які були ухвалені Організацією Об'єднаних Націй у 2015 році [4] як універсальний заклик до дій щодо скорочення бідності, захисту планети та забезпечення миру та процвітання для всіх

людей. ЦСР містять 17 цілей та 169 завдань, які враховують різні аспекти сталого розвитку, включаючи "зелені" технології. Наприклад, Ціль 7 передбачає забезпечення доступу до відновлюваних джерел енергії, Ціль 9 - побудову стійкої інфраструктури та сприяння інноваціям, Ціль 12 - впровадження відповідального споживання та виробництва, Ціль 13 - боротьбу зі зміною клімату, Ціль 14 - збереження морських екосистем, Ціль 15 - збереження екосистем суходолу.

Таким чином ми бачимо, що в глобальній ініціативі «Зелена» енергетика відповідає багатьом критеріям для досягнення поставлених цілей.

Іншим цікавим документом з цієї теми є доповідь Програми розвитку ООН (ПРООН) про соціальні та економічні переваги глобальної «зеленої революції» [5], яка аналізує як посилені короткострокові кліматичні зобов'язання, відомі як національно визначені внески (НВВ), так і довгострокові стратегії, в яких країни описують свої плани щодо досягнення нульового рівня викидів. У доповіді представлені підходи, що застосовуються у п'яти країнах, які ведуть процес справедливого переходу: Антигуа та Барбуда, Коста-Ріка, Індія, Сербія та Південна Африка. У доповіді також визначено п'ять ключових способів, за допомогою яких справедливий перехід може допомогти в реалізації Паризької угоди.

Незважаючи на те, що питання пов'язані з «Зеленою» енергетикою обговорюються та плануються на найвищих рівнях, а стратегії по їх впровадженню носять характер державних та міжнародних політик, нажал в реальному житті ми бачимо дуже небагато прикладів реалізації цього напрямку. Це пов'язано з відсутністю розуміння населенням та громадами можливих зисків від впровадження, не достатньо пропрацьовано стратегії впровадження цих технологій в електричні системи, не достатньо пропрацьовано системи керування для розподіленої генерації.

III. МЕТА РОБОТИ

Мета роботи полягає у вивченні та визначенні ролі "Зеленої енергетики" як ключового елемента впровадження концепції розподіленої генерації. Досліджуються аспекти використання відновлюваних джерел енергії та їхній внесок у стабільність та сталість енергетичних систем. Аналізується важливість зелених технологій у забезпеченні сталого розвитку та зменшенні впливу на довкілля. Робота спрямована на розуміння та вдосконалення концепцій енергетичного виробництва для підтримки еко-логічної та економічної ефективності. Основні завдання включають в себе удосконалення моделі фотоелектричної панелі за допомогою уточнюючого коефіцієнту, розрахунок впливу коефіцієнта корисної дії (ККД) інвертору на потужність, та розробку моделі вітрогенератора з урахуванням аеродинамічних характеристик. Отримані результати порівнюються з реальними даними для валідації та визначення ефективності роботи систем. Робота спрямована на вдосконалення прогнозу-

вання електрогенерації в гібридних системах та оптимізацію їх ефективності.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Концепція розподіленої генерації має на меті встановлення малопотужних генераторів електроенергії у безпосередній близькості від споживача. При цьому можливе використання низьковольтних ліній електропередачі. Генерація енергії у безпосередній близькості від споживача дозволить розвантажити існуючі лінії електропередач (ЛЕП) та знизити втрати.

Якщо при генерації електроенергії додатково виробляється та споживається теплова енергія, це буде ще одним «бонусом» даної технології. Більше того, з'являється можливість ефективно використовувати локальні енергетичні ресурси – особливо це стосується відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, енергія біомаси та гідроенергія. Розподілений характер цих джерел енергії успішно збігається з концепцією розподіленої генерації. Залежно від конкретних умов, сонячна електростанція може бути приєднана до централізованих мереж – такий варіант доцільний за потужності електростанції на ВДЕ від кількох десятків кіловат до кількох мегават. Якщо ж джерело енергії невелике, то його краще встановити в безпосередній близькості від споживача.

У разі віддаленого розташування споживачів економічно ефективним буде автономне електропостачання кожного будинку або створення локальної мережі електропостачання, яка отримуватиме енергію від розподілених місцевих джерел електроенергії.

При електрифікації кількох об'єктів і малих селищ, зазвичай, разом із сонячними електричними станціями (СЕС) застосовуються інші джерела енергії: вітроустановки (ВЕС), гідроелектростанції, дизельні електрогенератори тощо. У разі гібридної електростанції вимоги до ємності акумуляторної батареї можуть бути суттєво нижчими, оскільки в періоди недостатнього приходу сонячної енергії з'являється можливість електропостачання споживачів від альтернативних та резервних джерел. В даний час як резервні джерела застосовуються в основному дизельгенератори.

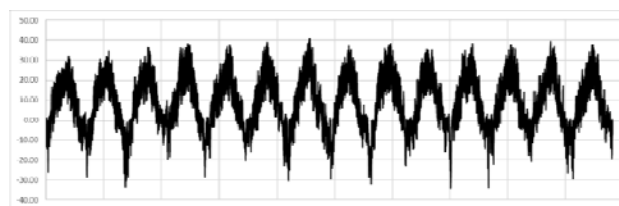
Для керування системою з кількох різних ВДЕ, системи акумулявання та споживачів необхідно розробити відповідні моделі для імітації роботи цих елементів. Найбільш розповсюдженими ВДЕ є СЕС та ВЕС.

В якості об'єкту дослідження обрано можливе будівництво СЕС та ВЕС потужністю по 1 МВт кожне. Розглянемо громаду, яка знаходиться на східній Україні та має близько 17 тисяч населення. Накопичувачі планується використовувати для компенсації відхилення генерації на ВДЕ від прогнозованих значень, що дозволить їм фактично вийти на гарантовані погодинні значення аналогічно традиційним електричним станціям.

Необхідні для створення моделі та проведення аналізу дані було взято з сайту [6], що надає інфор-

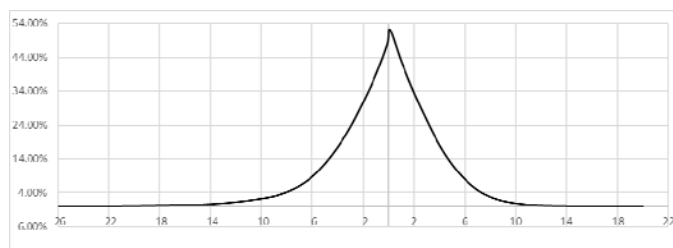
мацію по погодним умовам з великої кількості різноманітних джерел. На підставі відкритих даних було отримано інформацію про температуру оточуючого середовища, швидкість вітру та інтенсивності світла з кроком у 15 хвилин, який відповідає вкрай високій точності короткострокових прогнозів, для терміну у 14 років.

Температура є досить важливим вхідним параметром для розробленої моделі, так як вона впливає на генерацію від СЕС та ВЕС. Отримані часові серії температури не потребують додаткової обробки, так як при моделюванні однаково можливо використовувати як градуси Цельсія так і градуси Кельвіну. Загальний вигляд температурної характеристики обраного регіону відображено на рисунку 1.



Рисунку 1. Температурна характеристика для громади.

Аналіз кореляції між щорічними значеннями та середнім за обраний період показує співвідношення на рівні 94%. Такий рівень дає змогу встановити, що ми маємо можливість використовувати середні за обраний період значення для кожного інтервалу для проведення моделювання, однак для підвищення точності кращим рішенням буде використати реальні дані. Так аналіз показав, що відхилення у більший бік має дещо більшу вірогідність, а саме 52,09% проти 47,91%. Графік вірогідності відхилення у той або більший бік відображено на рисунку 2. Статистично відносно середнього синтезованого значення для кожного інтервалу середнє відхилення у більший бік складає 21,6%, а у менший – 15,12%. Усереднений температурний графік відображено на рисунку 3.



Рисунку 2. Розподіл вірогідності відхилення температури від середнього значення

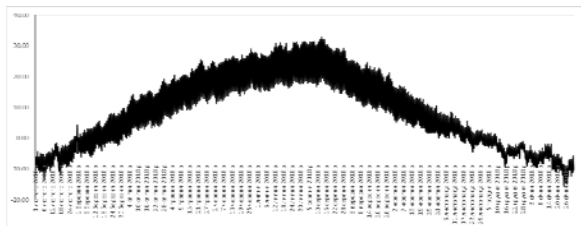


Рисунок 3. Усереднений температурний графік.

Часові серії сонячної радіації можливо отримати для горизонтальної або фіксовано нахиленої поверхні. Саме тому було зроблено вибірку даних для фотоелектричної панелі північної орієнтації з кутом нахилу 60 градусів. Сумарний графік сонячної радіації у обраному регіоні за 14 років має вигляд наведений на рисунку 4.

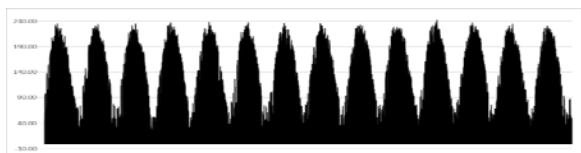


Рисунок 4. Графік сонячної радіації для СЕС з фіксованим кутом нахилу.

При проведенні дослідження виявлено кореляцію річних часових серій з середнім значенням на рівні 93%. Кількість відхилень у більшу сторону переважає та становить близько 75 %. Середнє відхилення у менший бік значно більше за абсолютним значенням та становить 21% проти 15,7%. Графік вірогідності відхилення відображено на рисунку 5. Аналогічно температурним часовим серіям на основі кореляції можливо зробити висновок про допустимість використання середніх для інтервалу значень та перевагу над ними реальних даних. Синтезований графік сонячної радіації відображено на рисунку 6.

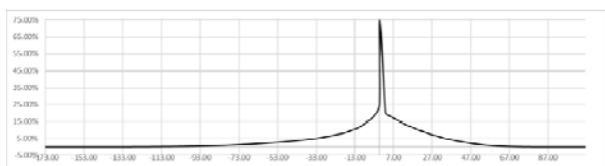


Рисунок 5. Розподіл вірогідності відхилення сонячної радіації від середнього значення.

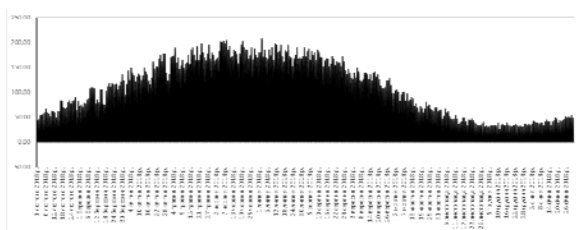


Рисунок 6. Синтезований графік сонячної радіації для СЕС з фіксованим кутом нахилу у обраному регіоні.

Часові серії швидкості вітру для обраного регіону також були отримані на метеорологічному сайті [7]. Однак на відміну від попередніх даних кореляція з середнім синтезованим значенням складає лише 44%, що ставить під сумнів можливість використання синтезованого значення.

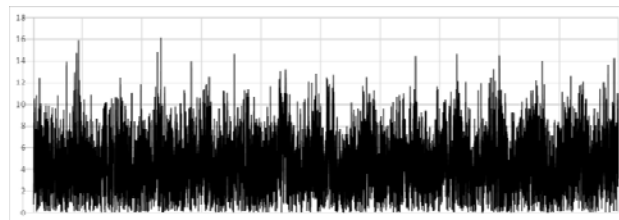


Рисунок 7. Сумарний графік швидкості вітру на 10 метрах висоти.

У випадку, якщо висота башти вітряка буде відрізнятися від стандартної висоти метеорологічного вимірювання швидкості вітру 10 м, необхідно використати формулу 1 [8]. З причини складності розташування вітряків у міській межі в якості поправочного коефіцієнту пропонується використати відповідний для сільськогосподарських земель з групами будівель з класом шорсткості 2,5, що становить 0,335.

$$V_1 = V_0 \cdot \left(\frac{H_1}{H_0} \right)^k \quad (1)$$

Де V_1 – швидкість вітру на заданій висоті;
 V_0 – швидкість вітру на висоті метеорологічних досліджень;

H_1 – задана висота;

H_0 – висота метеорологічних досліджень;

k – поправочний коефіцієнт, що відповідає емпіричному показнику шорсткості для обраного регіону;

Ситуація, коли швидкість вітру є меншою за середню має вірогідність 53,9%. Однак середнє відхилення у більший бік складає 85,38% відсотка проти 65,65%. Графік вірогідності відхилень відображено на рисунку 8, а синтезованої середньої швидкості на рисунку 9.



Рисунок 8. Розподіл вірогідності відхилення швидкості вітру від середнього значення.

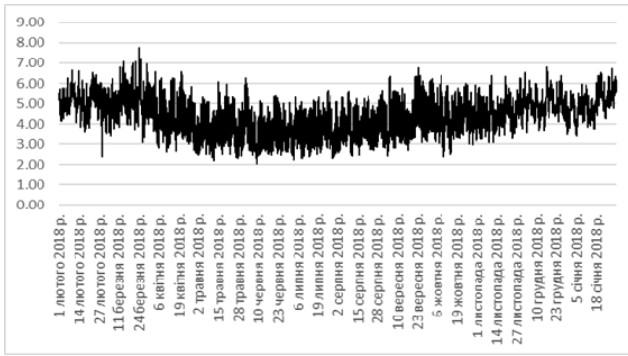


Рисунок 9. Графік швидкості вітру на висоті 10 м для обраного регіону.

Також для перевірки роботи алгоритму, що буде залучати систему акумуляування для компенсації виникаючих відхилень від запланованих графіків генерації, необхідно буде створити штучні відхилення. Для вирішення цієї задачі необхідно буде синтезувати нові графіки генерації з урахуванням можливого добового відхилення на 20% від загальної кількості виробленої енергії. Тому після розробки моделей генеруючого обладнання необхідно буде обробити необхідні вихідні дані по генерації. Якщо для вирішення цієї задачі синтезувати графіки на основі лише погодних відхилень результати матимуть меншу точність. Саме тому необхідно розглянути енергетичне прогнозування на основі вихідних даних з моделями та залучити до цього наступні додаткові умови:

- добове відхилення по кількості виробленої енергії становить максимум 20% для одиначної установки на ВДЕ;
- припускається, що відхилення може бути між мінімальним та максимальним значенням окремо для кожного періоду;
- відхилення повинні підкорятися законам нормального розподілення або реально існуючим графікам вірогідного відхилення;

Модель фотопанелі для швидкого розрахунку значення вихідної потужності базується на рівнянні (2):

$$P_{pv} = n \cdot f_v \cdot P_{stc} \cdot \frac{G}{G_{stc}} \cdot [1 + k_p \cdot (T_{emp} - T_{stc})] \quad (2)$$

де f_v – коефіцієнт зношеності (близько 0.9), що відображає деякі втрати у системі, такі як затінення, старіння або втрати при передачі виробленої енергії;

P_{stc} – номінальна потужність при стандартних умовах;

G – поточний рівень сонячної іррадіації;

G_{stc} – рівень сонячної радіації при стандартних умовах;

k_p – температурний коефіцієнт;

T_{emp} – поточний рівень температури;

T_{stc} – рівень температури при стандартних умовах;

n – кількість фотоелектричних панелей;

Сама модель, виконана у середовищі Simulink має вигляд відображений на рисунку 10, а її покращена версія на 11. Врахування ККД генеруючого обладнання та інверторів виконується за допомогою елемента 1-D lookup table, у якому розраховується значення ККД в залежності від вихідної потужності фотопанелі.

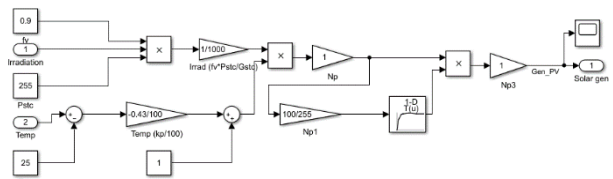


Рисунок 10. Модель сонячної електростанції

Однак такий спрощений розрахунок показує недостатньо високу відповідність до реальних характеристик, що надаються виробниками обладнання. Наприклад при зміні характеристик відповідно до 250 Wp SPV MODULE можливо побачити, що відповідність заявленим розробником даних становить 95,47%. Саме тому було розраховано коефіцієнт кореляції, що збільшує відповідність результатів до заявлених, яку використовують до врахування роботи інвертору. Для цього можливо використати наступне рівняння:

$$P_{pv} = 1.0739P_{pv0} - 4.07 \quad (3)$$

З урахуванням внесення такої зміни до рівняння модель фотоелектричної панелі отримає вигляд відповідний до рисунку 11. Співвідношення між отриманими характеристиками та реальними наданими виробником [9] показані в таблиці 1.

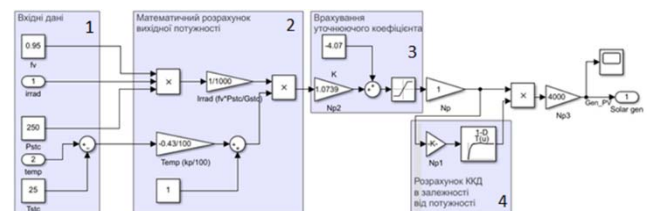
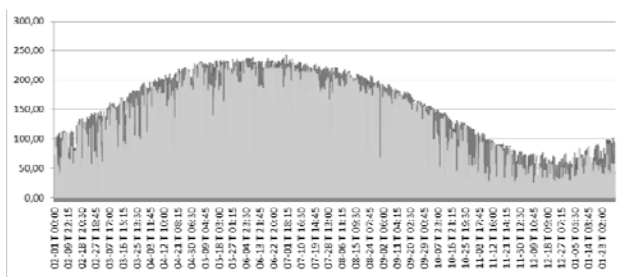
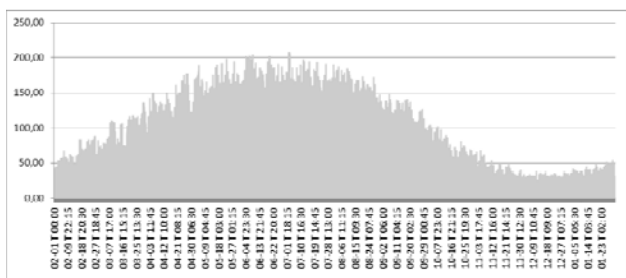


Рисунок 11. Модель сонячної електростанції. Оновлений варіант. Де 1 вхідні дані, 2 математичний розрахунок потужності на основі рівняння (3), 3 врахування уточнюючого коефіцієнту згідно рівнянню (4), 4 розрахунок впливу ККД інвертору в залежності від потужності.

Таблиця 1. Відповідність вихідних даних моделі ФЕП до заявлених виробником

Сонячна радіація, Вт/м ²	Оригінал	Перший варіант моделі	Другий варіант моделі
200	47,1	47,5	46,94
400	97,7	95	97,95
600	148,9	142,5	149
800	200,2	190	200
1000	250,9	237,5	251
Відповідність		95,47%	99,99%

Прикладом такого дослідження може стати аналіз необхідного об'єму накопичення на основі статистичних відхилень при генерації на СЕС та ВЕС. В рамках цього аналізу згідно статистичним даним на кожні 15 хвилин по температурі, швидкості вітру та рівню сонячної радіації за період від 1 лютого 2007 року до 31 грудня 2021 року було промодельована робота однієї фотоелектричної панелі потужністю 250 Вт та одного вітряка номінальною потужністю 10 кВт. Після проведення моделювання генерації на СЕС були отримані дані, що віднесені на рисунки 12 та 13.

**Рисунок 12.** Графік генерації однієї фотоелектричної панелі за 14 років, Вт.**Рисунок 13.** Середній за період дослідження графік генерації однієї фотоелектричної панелі, Вт.

В результаті моделювання виявлена загальна кореляція між кожним роком та виведеним середнім значенням, яка складає близько 93%, що дозволяє використовувати середнє розрахункове значення для довгострокових прогнозів. Звичайно, в обраному регіоні найбільша генерація від фотоелектричних панелей відбувається з березня по вересень з піком у червні та липні. Результати моделювання, пов'язані з відхиленням 15 хвилинних значень кожного року від середнього розрахованого, занесено у таблицю 2.

Таблиця 2. Аналіз відхилення генерації однієї фотоелектричної панелі потужністю 250 Вт від середнього прогнозованого.

Параметр	Надлишкова потужність	Недостатня потужність
Максимальне значення, Вт	106,55	172,39
Максимальне значення, %	42	68,95
Середнє значення, Вт	15,76	21,03
Середнє значення, %	6,3	8,41
Кількість відхилень, %	74,72	25,27
Макс тривалість, годин	16	16
Необхідна кількість енергії для зарядки або розрядки у найтяжчий період, Вт·год	274,85	374,32

Згідно отриманим даним для СЕС у обраному регіоні вірогідність відхилення у більшу сторону значно більша ніж у меншу. Однак пікове та середнє значення відхилення у більшу сторону амплітудно нижчі за відхилення у меншу.

Іншим важливим елементом для розрахунків на етапі моделювання є вітрогенератори, що обумовлюється їх аналогічно залежним від погоди характером генерації. Modeling and Simulation of an Autonomous Hybrid Power System [10] пропонує для створення моделі задатися тим, що ВЕС SW-10kW може працювати у чотирьох режимах:

- 1) Швидкість вітру нижча за мінімально необхідну. В цьому випадку вихідна потужність буде дорівнювати нулю.
- 2) Швидкість вітру вища за номінальну, але нижча за максимальну. В цьому випадку вихідна потужність буде дорівнювати номінальній.
- 3) Швидкість вітру вища за максимально допустиму. В цьому випадку вихідна потужність буде дорівнювати нулю (в цьому випадку задля збереження вітрогенератору він припиняє генерацію).
- 4) Швидкість вітру вища за мінімальну, але нижче номінальної. В цьому випадку вихідна потужність описується рівнянням:

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot (\lambda, \beta) \cdot p(z) \cdot A \cdot V_w^3 \quad (4)$$

Де P_{wt} – номінальна потужність вітряка;

C_p – аеродинамічний коефіцієнт, існує декілька методів розрахунку в реалізованій моделі використовуються заздалегідь розраховане значення для вхідних умов визначається за рівнянням 6. Підсистему, що використовується для обчислення цього коефіцієнту наведено на рисунку 14;

λ – коефіцієнт передачі швидкості, визначається за рівнянням 4;

β – коефіцієнт, що відображає кут повороту лопатей;

$\rho(z)$ – щільність повітря на висоті;

V_w – швидкість вітру;

A – площа охоплена лопатями;

n – кількість фотоелектричних панелей;

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{rotor} \cdot Rad}{60 \cdot V_w} \tag{5}$$

Де: n_{rotor} – кількість обертів ротору на хвилину;

Rad – радіус площі охопленої лопатями;

$$c_p = 0,73 \cdot \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0,58 \cdot \beta - 0,002 \cdot \beta^{2,14} - 13,2 \right) \cdot \exp \left[\frac{-18,4}{\lambda_i} \right] \tag{6}$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0,02\beta} - \frac{0,003}{\beta^2 + 1}} \tag{7}$$

Аналогічно до моделі СЕС в рамках моделі ВЕС за допомогою 1-d lookup table враховуються і ККД, а саме механічний та електричний. Використання цього елемента обумовлено змінним характером ККД в залежності від швидкості вітру та механічної потужності. Загальний вигляд розробленої моделі відображено на рисунку 15.

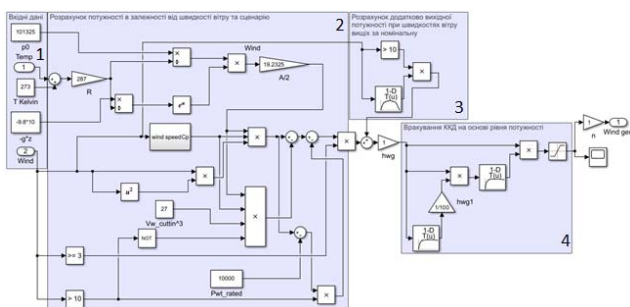


Рисунок 14. Модель вітроелектростанції.

Де: 1 - вхідні дані, 2 - розрахунок потужності в залежності від швидкості вітру відповідно до рівнянь (5-8), 3 - розроблена реалізація розрахунку потужності при швидкості вітру вище за номінальну, 4 - розрахунок впливу механічного і електричного ККД в залежності від потужності.

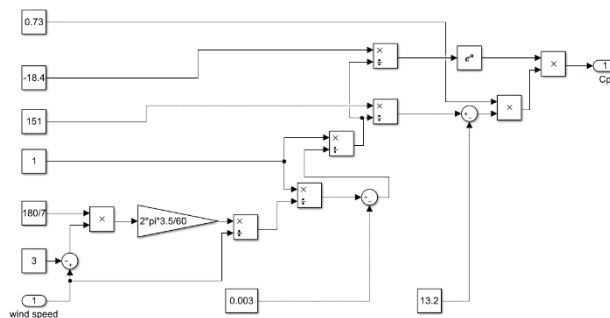


Рисунок 15. Розрахунок аеродинамічного коефіцієнту.

Для перевірки відповідності реальним даним дослідим співвідношення залежності вихідної потужності від швидкості вітру. Для цього побудуємо відповідний графік та проведемо порівняння з реальним прототипом на основі якого було побудовано модель [11], що відображено на рисунку 16.

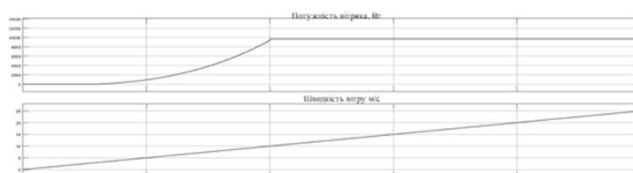


Рисунок 16. Результат дослідження вихідної потужності від швидкості вітру.

При порівнянні результатів з реальними даними виявляється, що пропонуєма Modeling and Simulation of an Autonomous Hybrid Power System модель на швидкості вітру вищій за номінальну не відповідає своєму реальному прототипу. Причиною цього є жорстка фіксація на номінальній потужності при таких швидкостях вітру. Саме тому було додатково враховано можливість видавати потужність вище за номінальну відповідно до реальної характеристики, що дозволило отримати нові вихідні дані відповідні до реального прототипу. Це відображено у лівій половині рисунку 17, а реальні дані, що стали базою для порівняння, показані у правій.

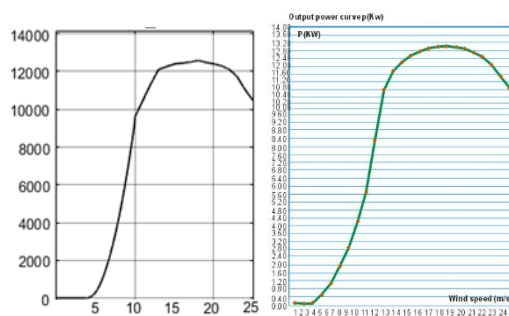


Рисунок 17. Вихідні данні фінального варіанту моделі ВЕС та оригінальні характеристики прототипу.

Результат моделювання роботи одиничного вітрогенератора з номінальною потужністю 10 кВт показує значно інший результат. На відміну від прогнозування для фотоелектричної панелі, результати для ВЕС показують кореляцію між кожним роком та середнім значенням на рівні 40%, що вказує на неможливість використання статистичного прогнозування виключно на основі середніх значень для аналізу роботи вітроустановок. Ще одна відмінність полягає в тому, що найбільша генерація для вітрогенераторів в обраному регіоні відбувається з жовтня по лютий. Саме на основі протилежності у піках річної генерації оптимальний варіант полягає в комбінуванні сонячних та вітроелектростанцій. На основі отриманих даних від моделювання сформовані рисунки 18 та 19.

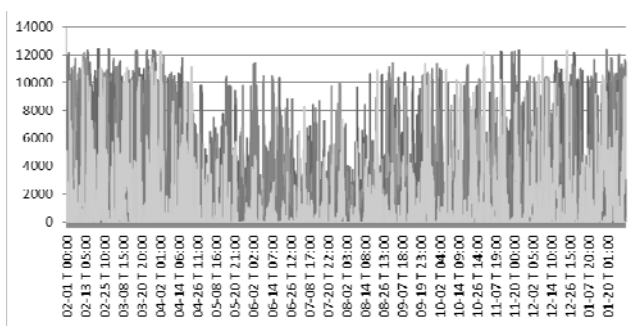


Рисунок 18. Графік генерації одним вітрогенератором, Вт.

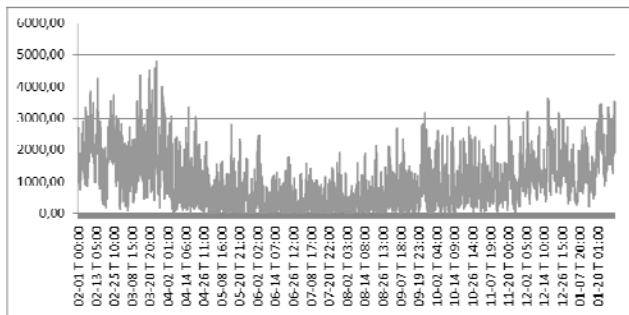


Рисунок 19. Середній за період дослідження графік генерації одним вітрогенератором, Вт.

Результати моделювання, пов'язані з відхиленням 15 хвилинних значень кожного року від середнього розрахованого, занесено у таблицю 3. Загальна картина аналізу також демонструє повну протилежність у порівнянні з ФЕП. Наприклад, надлишкова генерація менш ймовірна але має значно більше амплітудне значення. У пікові моменти відхилення можливі навіть варіанти, коли при відсутності генерації у середньому статистичному прогнозі для інтервалу, реальна генерація працює вище за номінальну потужність, що властиво на певному інтервалі швидкостей вітру для обраного вітряка.

Таблиця 3. Аналіз відхилення генерації вітрогенератора номінальною потужністю 10 кВт від середнього

Параметр	Надлишкова потужність	Недостатня потужність
Максимальне значення, Вт	11072,46	4796,10
Максимальне значення, %	110	47,96
Середнє значення, Вт	4099,47	949,32
Середнє значення, %	40,99	9,49
Кількість відхилень, %	25,75	74,24
Макс тривалість, годин	181,25	411,75
Необхідна кількість енергії для зарядки або розрядки у найтяжчий період, Вт·год	744772	392081

прогнозованого.

Даний розділ містить важливий виклад основного матеріалу та аналіз отриманих результатів з моделювання СЕС та ВЕС в східній Україні.

Розроблена модель сонячної електростанції дозволяє прогнозувати генерацію електроенергії на основі сонячної радіації та інших погодних параметрів.

Проведена перевірка моделі на реальних даних свідчить про високу відповідність отриманих результатів та заявленим виробником характеристикам фотопанелей, що підтверджує її точність та ефективність.

Розроблена модель вітрогенератора враховує аеродинамічні та електричні втрати, а також залежність вихідної потужності від швидкості вітру.

Модель показує можливість адаптації до реальних умов шляхом врахування динамічної залежності вихідної потужності від швидкості вітру, що підвищує її точність.

Аналіз результатів генерації електроенергії показує, що комбінування сонячної та вітрової енергії може забезпечити стабільніше виробництво електроенергії протягом року.

Виявлені характеристики генерації дозволяють зробити висновок, що оптимальне використання різних джерел енергії може компенсувати коливання виробництва від одного джерела.

Аналіз відхилень від середніх значень генерації показує, що для СЕС ймовірність відхилення в меншу сторону є меншою, але амплітуда відхилень може бути значною.

Для ВЕС спостерігається низька кореляція між

річною генерацією та середніми значеннями, що свідчить про необхідність індивідуального підходу до прогнозування.

V. ВИСНОВКИ

Дослідження можливості впровадження сонячних електростанцій та вітрогенераторів в обраному регіоні розкриває перспективи та виклики альтернативної та зеленої енергетики. Розроблені моделі СЕС та ВЕС продемонстрували ефективність прогнозування генерації електроенергії, забезпечуючи високу відповідність отриманих результатів заявленим виробником характеристикам.

Зазначена адаптивність моделі ВЕС до реальних умов, зокрема, динамічне врахування залежності вихідної потужності від швидкості вітру, підкреслює її точність та можливість адаптації до різних сценаріїв. Виявлено, що комбінація сонячних та вітрових джерел енергії може сприяти стабілізації виробництва електроенергії протягом року, компенсуючи коливання виробництва від окремих джерел.

Аналіз відхилень та кореляцій генерації вказує на потребу індивідуального підходу до прогнозування, зокрема, для ВЕС, де річна генерація не завжди корелює з середніми значеннями. Отримані результати свідчать про важливість урахування регіональних особливостей та динамічних змін у погодних умовах для точного моделювання систем альтернативної та зеленої енергетики.

У рамках проведеного дослідження було виявлено, що моделі СЕС та ВЕС в обраному регіоні демонструють високий рівень точності у прогнозуванні генерації електроенергії. Модель СЕС, оптимізована з урахуванням уточнюючого коефіцієнту, відображає високу відповідність реальним характеристикам, представленим виробником. Варіант моделі ВЕС, який дозволяє видачу потужності вище за номінальну відповідно до реальних характеристик, дозволяє отримати більш точні відображення динаміки генерації.

У різних частинах року відмічається значна різниця в генерації від ВЕС, що вказує на важливість комплексного підходу до створення енергетичних систем. Результати надають підтримку ідеї комбінування сонячних та вітрових джерел, що дозволяє стабілізувати виробництво електроенергії та забезпечити постійний потік енергії протягом року.

Аналіз відхилень генерації вітрогенератора вказав на необхідність індивідуальних підходів до прогнозування та врахування регіональних особливостей. Зокрема, виявлено, що в середньому статистичному прогнозі можуть виникати ситуації, коли реальна генерація вища за номінальну потужність вітрогенератора, що свідчить про необхідність більш детального врахування динаміки швидкості вітру.

Отже, виявлені особливості та потенціал сонячних та вітрових енергетичних установок у конкретному регіоні надають базу для розвитку стійких та продуктивних енергетичних систем, що використовують зелені технології та сприяють сталому розвитку. Моделі, розроблені в ході дослідження, можуть служити важливим інструментом для оптимізації та удосконалення енергетичних систем на місцевому та глобальному рівнях.

Узагальнюючи, дослідження вказує на перспективи створення стійких та продуктивних енергетичних систем, базованих на використанні відновлювальних джерел енергії та зелених технологій. Розроблені моделі можуть слугувати підґрунтям для подальших досліджень, оптимізації та розгортання альтернативних та зелених енергетичних рішень для сталого розвитку.

Результати вказують на важливість інтеграції сонячних та вітрових джерел у енергетичні системи для забезпечення сталого виробництва електроенергії та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Моделі, розроблені під час дослідження, можуть використовуватися для планування, оптимізації та ефективного використання зелених енергетичних ресурсів.

Таким чином, зелена енергетика, базована на сонячних та вітрових технологіях, визначає новий етап розвитку енергетичної сфери, сприяючи переходу до екологічно чистих та стало ефективних рішень у сфері виробництва електроенергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Презентовано проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року | Кабінет Міністрів України (kmu.gov.ua)
- [2] Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року | Держенергоефективності України (saee.gov.ua)
- [3] Огляд Стратегії енергетичної безпеки України від ЄУЕА – ЕУЕА - European-Ukrainian Energy agency (euea-energyagency.org)
- [4] <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-stalohorozvytku>
- [5] How Just Transition can help deliver the Paris Agreement | Climate Promise (undp.org)
- [6] Falaghi, H. ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems [Text] / H. Falaghi, M. Haghifam // PowerThech. – 2007. - P. 555-560.
- [7] MERRA NASSA [Електронний ресурс] // SoDa pro. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.soda-pro.com/web-services/meter-data/merra>
- [8] Літвицька О. І. Взаємодія вітрових потоків з

- огороджувальними конструкціями висотних будівель / О. І. Літвицька. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2013. – №755. – С. 232–236.
- [9] PV Module SPR-343NX-WHT-D [Електронний ресурс] // Solar Hub. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/46685-SPR-343NX-WHT-D-SunPower>.
- [10] Fikari S. G. Modeling and simulation of an autonomous hybrid power system / Stamatia Gkiala Fikari. – Uppsala, 2015. – 95 с.
- [11] SW-10KW WIND TURBINE [Електронний ресурс] // Wind Power. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.windpowercn.com/products/18.html>.
- [12] SINGH, Bindeshwar; SHARMA, Janmejay. A review on distributed generation planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 529-544.
- [13] Fedorchuk, S., Kulapin, O., Ivakhnov, A., Danylchenko, D., Dryvetskyi, S. «Using the Concept of Prosumers as a Staff for Balancing at the Power Grid». *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 481. Springer, 2023, 223 – 243 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_13
- [14] Данильченко, Д. О., С. О. Федорчук, А. В. Івахнов, О. В. Кулапін, і В. В. Гриценко. «Дослідження перспектив застосування соціодемографічних даних для аналізу потенціалу керування попитом». *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, вип. 1 (4), Липень 2022, с. 11-16, doi:10.20998/2224-0349.2022.01.06.
- [15] Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Цюпа В. М., Потривай А. Е. «Можливість створення data-керованої сучасної енергосистеми». *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*, № 2 (27), 2022, с. 5-9, <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2022-2-5-9>
- [16] Shevchenko S, Danylchenko D, Potryvai A, Minakova K, Dryvetskyi S. Finding Software Ways to Reduce the Error for the Solar Power Plant Simulation Model. *Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022*; 2022. p. 277-280. DOI: 10.1109/TCSET55632.2022.9766844
- [17] Shevchenko, S., Danylchenko, D., Potryvai, A., Miroshnyk, O., Tsiupa, V. & Dryvetskyi, S. 2022, "Improvement of the Simulation Model of a Solar Power Plant, Modernization of the Block for Accounting for the Effect of Cooling Panels by Wind Currents", *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022*. DOI 10.1109/MEES58014.2022.10005722

Стаття надійшла до редакції 30.01.2024

GREEN ENERGY AS A KEY ELEMENT OF THE IMPLEMENTATION OF THE CONCEPT OF DISTRIBUTED GENERATION

- DANYLCHENKO D.O. Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Energy Transmission of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7912-1849;
- FEDORCHUK S.O. Ph.D., senior lecturer of the Department of Power Stations of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: stanislav.fedorchuk@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7676-8313;
- POTRYVAY A.E. graduate student of the Department of Electrical Energy Transmission of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: andrii.potryvai@ieec.khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1250-7525;
- MINAKOVA K.O. Ph.D., associate professor, associate professor of the Department of Physics of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: kсениа.minakova@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8869-1082;
- PETROV S.O. Ph.D., Associate Professor, Professor of the Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: serhii.petrov@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-

6500-5310

PETROVA Y.V.

PhD, senior lecturer of the foundry department of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: yuliia.petrova@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8184-906X;

Purpose. The purpose of this article is to study the role of "Green energy" in the concept of the distributed generation, to analyze the contribution of renewable sources to the energy stability. The main tasks include improving models of photovoltaic panels and wind generators to achieve environmental and economic efficiency.

Methodology. Mathematical modeling of photovoltaic panels and wind generators, analysis of the influence of the refining factor and the efficiency factor of the inverter on power generation. A comparative analysis of the obtained results with real data is used to validate the models. The aerodynamic characteristics of the wind generator and its impact on the output power are studied. An optimised model is being developed to predict the efficiency of hybrid systems using green technologies

Findings. The obtained research results reveal the key contribution of "Green Energy" to the concept of distributed generation. Methods of mathematical modelling of photovoltaic panels and wind turbines, together with the use of a correction factor and consideration of inverter efficiency, have improved the accuracy of power generation. The developed model takes into account the aerodynamic characteristics of the wind generator, emphasizing the realized possibility of exceeding the nominal power in accordance with the real characteristics. The obtained results are compared with real data for validation and confirmation of the effectiveness of the system.

Originality. It consists in improving the model of combined generation of photovoltaic panels and a wind generator, by taking into account the operation of the inverter. Data were also obtained on the potential of using a hybrid station in the selected region and its advantages over the use of separate SES and wind turbines were proven.

Practical value. It consists in optimizing the forecasting of electricity generation in hybrid systems, which is determined by increasing accuracy and adaptability to real conditions. The study reveals the potential for the development of "Green Energy" in communities with a large area and medium capacity.

Keywords: green energy; distributed generation; mathematical modeling; photovoltaic panels; wind generators; electricity generation; hybrid systems.

REFERENCES

- [1] Prezentovano proekt Kontseptsiiy «zelenoho» enerhetychnoho perekhodu Ukrayiny do 2050 roku | Kabinet Ministriv Ukrayiny (kmu.gov.ua)
- [2] Natsional'nyy plan diy z enerhoefektyvnosti na period do 2030 roku | Derzhenerhoefektyvnosti Ukrayiny (sace.gov.ua)
- [3] Ohlyad Stratehiyi enerhetychnoyi bezpeky Ukrayiny vid YEUEA – EUEA - European-Ukrainian Energy agency (euea-energyagency.org)
- [4] <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-stalohorozvytku>
- [5] How Just Transition can help deliver the Paris Agreement | Climate Promise (undp.org)
- [6] Falaghi, H. ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems [Text] / H. Falaghi, M. Haghifam // PowerTech. – 2007. - P. 555-560.
- [7] MERRA NASSA [Електронний ресурс] // SoDa pro. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra>
- [8] Litvyts'ka O. I. Vzayemodiya vitrovykh potokiv z oho-rodzhuval'nymy konstruktsiyamy vysotnykh budivel' / O. I. Litvyts'ka. // Visnyk Natsional'-noho universytetu "L'vivs'ka politekhniky". – 2013. – №755. – S. 232–236.
- [9] PV Module SPR-343NX-WHT-D [Електронний ресурс] // Solar Hub. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/46685-SPR-343NX-WHT-D-SunPower>.
- [10] Fikari S. G. Modeling and simulation of an autonomous hybrid power system / Stamatia Gkiala Fikari. – Uppsala, 2015. – 95 c.
- [11] SW-10KW WIND TURBINE [Електронний ресурс] // Wind Power. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.windpowercn.com/products/18.html>.
- [12] SINGH, Bindeshwar; SHARMA, Janmejay. A review on distributed generation planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 529-544.
- [13] Fedorchuk, S., Kulapin, O., Ivakhnov, A., Danylchenko, D., Dryvetskyi, S. «Using the Concept of Prosumers as a Staff for Balancing at the Power Grid». Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control, vol 481. Springer, 2023, 223 – 243 r.

- https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_13
- [14] Danyl'chenko, D. O., S. O. Fedorchuk, A. V. Ivakhnov, O. V. Kulapin, i V. V. Hrytsenko. «Doslidzhennya perspektyv zastosuvannya sotsiodemohrafichnykh danykh dlya analizu potentsialu keruvannya popytom». Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Enerhetyka: nadiynist' ta enerhoefektyvnist', vyp. 1 (4), Lypen' 2022, s. 11-16, doi:10.20998/2224-0349.2022.01.06.
- [15] Shevchenko S. YU., Danyl'chenko D. O., Tsyupa V. M., Potryvai A. E. «Mozhlyvist' stvorennya datakerovanoyi suchasnoyi enerhosystemy». Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Elektrotekhnika i enerhetyka», № 2 (27), 2022, s. 5-9, <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2022-2-5-9>
- [16] Shevchenko S, Danylchenko D, Potryvai A, Minakova K, Dryvetskyi S. Finding Software Ways to Reduce the Error for the Solar Power Plant Simulation Model. Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022; 2022. p. 277-280. DOI: 10.1109/TCSET55632.2022.9766844
- [17] Shevchenko, S., Danylchenko, D., Potryvai, A., Miroshnyk, O., Tsiupa, V. & Dryvetskyi, S. 2022, "Improvement of the Simulation Model of a Solar Power Plant, Modernization of the Block for Accounting for the Effect of Cooling Panels by Wind Currents", Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022. DOI 10.1109/MEES58014.2022.10005722

УДК. 62-50

ВИКОРИСТАННЯ КРИТЕРІЇВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЕЛЕВАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ

- КУНДЕНКО М.П.** док. техн. наук, професор, професор кафедри теплотехніка та енергоефективні технології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: n.p.kundenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5841-4367;
- МАРДЗЯВКО В.А.** аспірант Державного біотехнологічного університету, Харків, Україна, e-mail: vitalijmardzavko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7327-9215;
- РУДЕНКО А.Ю.** аспірант Державного біотехнологічного університету, Харків, Україна, e-mail: andrey0911r@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5103-6412;

Мета роботи. Метою даної роботи є описання критеріїв оптимальності для визначення напрямку вирішення задачі оптимізації транспортно-технологічних маршрутів зернової продукції на елеваторному комплексі.

Методи дослідження. Був застосований аналітичний метод дослідження, для визначення технологічних характеристик лінії елеваторного комплексу та залежності якості транспортуючої продукції від побудованого маршруту транспортування. Застосовано математичний метод для опису складових елементів критеріїв оптимізації.

Отримані результати. Був визначений один із напрямків підвищення й покращення технологічного процесу на елеваторі, шляхом удосконалення алгоритмів керування в напрямку оптимізації технологічних процесів елеватора за багатьма критеріями. За критерії оптимізації, для забезпечення оптимальних умов транспортування повинні використовуватися мінімум втрат, мінімум часу на транспортування, мінімум енергозатрат та мінімальна довжина прокладеного шляху транспортування, тому був виконаний опис основних критеріїв які в першу чергу можуть вплинути на ефективність роботи елеваторного комплексу.

Наукова новина. Визначений напрямок вирішення задачі оптимізації транспортно-технологічних маршрутів. Аналітичне виведення критерію мінімум енергозатрат та критерію мінімум бою зерна.

Практична цінність. Оптимізація елеваторного комплексу для забезпечення варіативного транспортування зернових мас, що вплине на підвищення продуктивності і якості технологічного процесу елеваторного комплексу.

Ключові слова: мінімізація бою зернової продукції, мінімум енергозатрат, програмно-логічний контролер, логічні рівняння, елеваторний комплекс, процес маршрутизації.

I. ВСТУП

Сучасний метод прокладання та забезпечення процесу транспортування зернової продукції по елеватору [1]-[2] базується на різних засобах забезпечення технологічного процесу, як результат він характеризується наявністю у своєму складі виконавчих механізмів і обладнання для транспортування та електронного обладнання: датчиків, програмованих контролерів, програмного забезпечення з підтримкою програмування - SCADA систем і т.д. [3], однак розглядаючи [4]-[5] сучасну організацію та функціональну структуру елеваторного комплексу, стає зрозумілим, що автоматизована система залишається без значних змін, а отже і якість управління технологічним процесом транспортування зернової продукції теж не змінюється. Оскільки потреби продовжують збільшуватися, виникає необхідність підвищення ефективності процесів за збереженням тих самих умов, використовуючи можливі невеликі зміни, такі як модернізація, оптимізація та удосконалення, з чого

виникає завдання в оптимізації процесу маршрутизації технологічного процесу транспортування.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для підвищення надійності та забезпечення ефективного процесу транспортування можуть використовуватися резервні транспортні гілки (додаткові вертикальні або горизонтальні транспортери), а для підвищення виробничих показників – додаткові транспортні гілки та зерно-обробні машини для одночасного прийому або вивантаження продукції на декілька автомобілів або вагонів одночасно [6]-[7]. Таким чином, під час транспортування зернової продукції може бути велика кількість маршрутів слідування зерна з одного технологічного пункту до іншого, один з яких зазвичай обирає вручну оператор, оскільки використовувати програмні комплекси керування технологічним обладнанням не мають можливості автоматичного пошуку маршрутів слідування зерна.

Існуючі алгоритми маршрутизації елеватора по-

будовані так, що обирається перший вільний наявний маршрут із заздалегідь запрограмованих, без врахування його ефективності. Маршрути програмуються без урахування критеріїв оптимальності, які б і забезпечували вибір або побудову оптимального маршруту, забезпечуючи якісні умови транспортування. Застосування даного методу призводить до значних збільшень затрат, в фінансовому плані так й в практичному.

З розглянутого раніше аналізу [8]-[9] маршрутизації технологічного процесу елеватора було визначено, що в якості умов побудови оптимального маршруту може служити критерій сумарного часу транспортування, довжина маршруту, енергоощадність та якість зерна.

Застосування автоматизованої системи прокладки маршрутів [10]-[11] в якій можна застосовувати певні критерії для оптимізації процесу транспортування та буде враховувати стан обладнання, дасть можливість будувати оптимальний маршрут для забезпечення та збереження необхідної продуктивності, а в деяких випадках забезпечить більшою ефективністю.

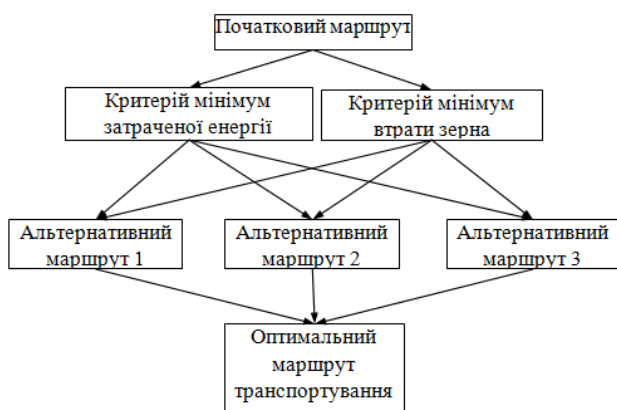


Рисунок 1. Схема зв'язків критеріїв оптимізації та прокладання альтернативних маршрутів транспортування

На рис. 1 ми можемо побачити залежність оптимізаційного маршруту від критеріїв оптимізації, які своєю чергою допомагають прокласти відповідний маршрут транспортування.

Використовуючи критерії оптимізації, система може вибирати більш ефективний маршрут транспортування із заздалегідь запрограмованих. Застосовуючи відповідний критерій ми можемо будувати альтернативні маршрути транспортування які відрізнятимуться від стандартних, дана можливість дасть нам більшу мобільність при тих же затратах. Наприклад, розглянемо ситуацію з прибутковістю елеватора, де необхідно, щоб зерно відповідало встановленим експортним стандартам, тобто підприємство само вирівнює і коригує якість зерна. Для досягнення цієї якості часто доводиться штучно змішувати різні пар-

тії зерна, що може бути здійснено за рахунок складання необхідного технічного завдання і внесення змін в керуючу програму формування маршрутів переміщення зерна [12]. За допомогою даного рішення вирівнювати якість зерна на експорт стало можливо до 50 % від усього прийнятого обсягу [13], однак витрачаються багато зусиль.

Розглядаючи зерно, яке призначене для експорту, слід враховувати, що це вимагає вищих стандартів якості. Використання критеріїв мінімізації втрат зерна та оптимальної довжини маршруту дозволить нам побудувати маршрут, який зменшить втрати зерна під час його транспортування (коефіцієнт бою зерна) і покращить його якість, тим самим зменшивши витрати на його формування та підвищити ефективність транспортного маршруту, в сукупності з попереднім рішенням, до 90 %.

Незважаючи на те що дане застосування критеріїв є ефективним, все ж зважаючи на необхідність покращення технологічних показників та зменшення затрачених ресурсів виникає ідея застосовувати зазначені критеріїв в момент прокладання маршруту транспортування [14]. Тобто транспортуючий маршрут буде будуватися в режимі реального часу, відштовхуючись від заданих критеріїв та отриманої інформації про стан обладнання, що дасть можливість не тільки будувати маршрут, але і змінювати його в залежності від потреб.

Спираючись на технологічне обладнання маршруту (див. рис. 2), поставлена задача оптимізації, буде вирішуватися за допомогою програмованого логічного контролера з урахуванням стану технологічного обладнання та можливості розгалуження визначають усі можливі на цей час маршрути переміщення зерна з вихідного до кінцевого пункту [15].

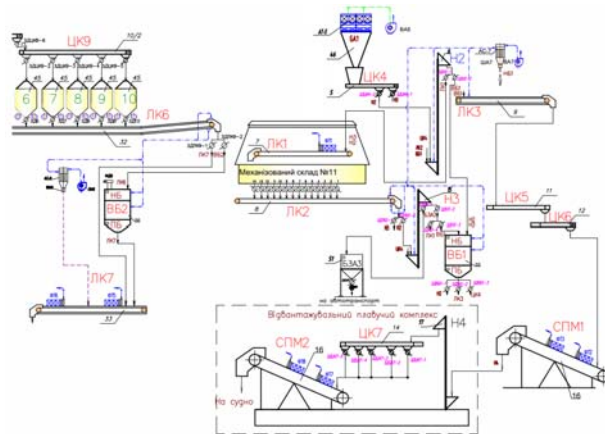


Рисунок 2. Частина технологічного маршруту транспортування зерна

Після чого з виділених маршрутів, з використанням принципу оптимальності та врахуванням потужності приводів транспортного обладнання та його впливу на якість зерна, видаються команди з вихідних

затискачів контролера на підготовку клапанів і засувок, що входять до складу технологічного обладнання оптимального за критерієм мінімізації приросту бою зерна під час транспортування та мінімуму електроспоживання маршруту під час транспортування. Після команди на запуск лінія вмикатиметься автоматично і працюватиме вже враховуючи програмно-логічні технологічні блокування, які спрямовані на забезпечення критеріїв оптимальності. Тобто система працюватиме, споживаючи при цьому мінімально можливу кількість електроенергії та наносячи мінімальні механічні пошкодження зерну в процесі транспортування.

III. ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ РОБОТИ

Метою даної роботи є описання критеріїв оптимальності для визначення напрямку вирішення задачі оптимізації транспортно-технологічних маршрутів зернової продукції на елеваторному комплексі.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

З розглянутого аналізу маршрутизації технологічного процесу елеватора було визначено один із критеріїв оптимізації який забезпечував би енергоефективності роботи зернопереробних та зернозберігаючих комплексів, даним критерієм виступає мінімум затрати електроенергії при процесі транспортування (електроспоживання маршруту). Енергоємність комплексу транспортно-технологічних операцій транспортуючого обладнання визначається сумарною кількістю енергії, що витрачається на виконання взаємно пов'язаних транспортних і технологічних операцій. Таким чином критерій оптимальності: мінімум електроспоживання маршруту можна охарактеризувати як сума потужностей електроприводів технологічних установок та приводів клапанів та засувок, що виконують технологічну операцію, враховуючи їх задіяність в процесі транспортування:

$$C_{e.min} = P_{e.дв.} k_n + P_{e.кл.} k_n + P_{e.зас.} k_n + \dots + P_i k_n, \quad (1)$$

де $P_{e.дв.}$ - сума потужностей електроприводів технологічних установок; $P_{e.кл.}$ - сума потужностей електроприводів клапанів технологічних установок; $P_{e.зас.}$ - сума потужностей електроприводів засувок технологічних установок; k - коефіцієнт, яких характеризує задіяність елемента в процесі маршрутизації ($k = 0$ - елемент використовується для транспортування, $k = 1$ - елемент не використовується для транспортування).

Описання даного критерію можливо на основі алгоритму прокладання маршруту транспортування за даним критерієм, рис. 3.

Виходячи з даного алгоритму ми бачимо, що прокладання маршруту транспортування відбуватиметься від мінімального значення до максимального в залежності від значення суми потужностей (всіх потужностей електроприводів) технологічних установок. Тобто приймемо, що для транспортування зерно-

вої продукції з точки А в точку Б система буде прокладати маршрут перевіряючи можливі варіанти та незагруженість цих маршрутів, якщо маршрут буде вільним то за результатами суми потужностей елементів маршрут буде прокладений.

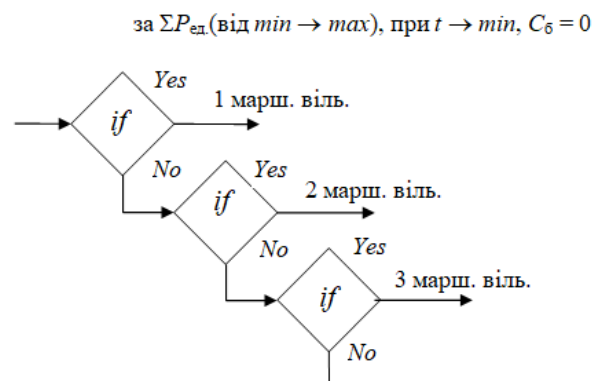


Рисунок 3. Алгоритм вибору прокладання маршруту за критерієм $C_{e.min}$

На основі зазначеного алгоритму, система може обирати маршрут транспортування не з маршрутів, а відразу прокладати його спираючись на дані електротехнічних установок, які будуть задіяні в процесі транспортування. До таких даних можна віднести призначення транспортних елементів, необхідність їх функціонування в даному процесі переміщення, та їх потужність.

Використання зазначеного критерію забезпечує додаткову умову транспортування, мінімізацію часу на транспортування, тобто при мінімізації затраченої електроенергії ми забезпечуємо кратність протяжності маршруту та задіяних технологічних установок, що в свою чергу позитивно впливає на час транспортування та покращення енергоефективності технологічного процесу в елеваторному комплексі. Однак використовуючи даних критерій відбувається нехтування втратами зернової продукції, які проявляються в пошкодженні та втрати з транспортуючого обладнання.

Пошкодження зернової культури під час їх транспортування по елеватору і засипання в ємності для зберігання - це фактори, з яким доводиться миритися. Всі зернові культури в різному ступені травмуються, отримуючи механічні пошкодження ще на полях під час збирання врожаю, і продовжуючи травмуватися на зерносховищах. Одним з факторів, що спричиняють бій зерна і зниження його якості в елеваторному комплексі є завантаження його в ємності для зберігання та переробки [9]. Як правило, перші десятки, або і сотні тонн зерна, які першими потрапляють в порожні металеві та бетонні ємності ушкоджуються і дробляться. Відповідно погіршуються якісні показники зерна та збільшується кількість недопустимих зернових домішок. Наступним фактором ушкодження зернової маси є його переміщення під

час технологічного процесу, яке відбувається технологічним обладнанням елеватора (транспортери, ноїї) [10].

Механічні uszkodження зерна під час транспортування відбувається внаслідок різноманіття технологічного обладнання та його впливу на зернові культури, а точніше взаємодія з різними фізичними параметрами, таким чином для досягання показників якості зернової маси, необхідно створення відповідних умов транспортування для різних видів або сумісних за показниками, зернових культур.

Для підвищення якості транспортування зерна в елеваторному комплексі можна впровадити автоматичний спосіб визначення оптимального маршруту за критерієм мінімізації приросту бою зерна під час транспортування.

Застосування оптимізаційного критерію $C_{б.мін}$ зерна може здійснюватися як і в попередньому випадку за рахунок програмно-логічного комплексу керування технологічним обладнанням, які відображатиме стан обладнання на маршруті. Прокладаються усі можливі на даний момент маршрути переміщення зерна з вихідного до кінцевого пункту і далі з виділених маршрутів, з врахуванням впливу транспортного обладнання на якість зерна, визначається найбільш оптимальний маршрут.

Розглядаючи механічні uszkodження зерна під час транспортно-технологічних операцій, їх можна охарактеризувати як суму впливу елементів транспортуючого обладнання, клапанів і засувок технологічного маршруту. При цьому необхідно враховувати, в кожному наступному елементі, коефіцієнт впливу попереднього елемента транспортуючого обладнання, таким чином критерій оптимальності за $C_{б.мін}$ зерна можна представити у вигляді:

$$C_{б.з.мін} = K_{б.ел}k_n + (K_{б.ел} + K_{б.ел2})k_n + (K_{б.ел} + K_{б.ел2} + K_{б.ел3}) \times k_n + \dots + \sum K_{б.елn+1}k_n, \quad (2)$$

де $K_б$ - коефіцієнт впливу елементів транспортуючого обладнання, клапанів і засувок технологічного маршруту; k - коефіцієнт, яких характеризує задіяність елемента в процесі маршрутизації ($k = 0$ - елемент використовується для транспортування, $k = 1$ - елемент не використовується для транспортування).

Використання зазначеного критерію при створенні маршруту транспортування може забезпечити зменшення механічних пошкодження зернової маси під час транспортування, що в свою чергу підвищить продуктивність та якість технологічного процесу в елеваторному комплексі. Також для підприємств, орієнтованих на міжнародні споживчі ринки, домінуючими є показники якості зерна, котрі в деяких випадках можна покращити за рахунок пошуку оптимальних маршрутів транспортування зерна за заданими оператором критеріями.

Описання даного критерію $C_{б.мін}$ можливо на ос-

нові алгоритму прокладання маршруту транспортування, рис. 4.

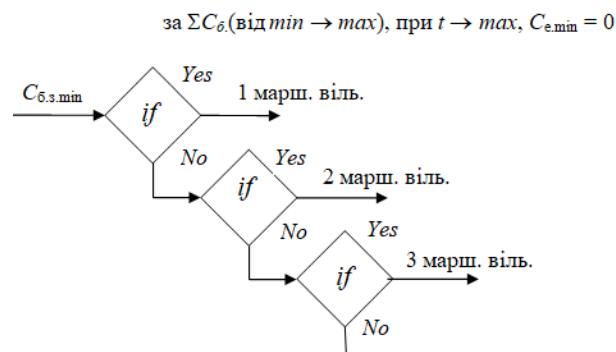


Рисунок 4. Алгоритм вибору прокладання маршруту за критерієм $C_{б.мін}$ зерна

З даного алгоритму ми бачимо, що як і в попередньому випадку що прокладання маршруту транспортування відбуватиметься від мінімального значення до максимального в залежності від значення суми величини коефіцієнта впливу елементів транспортуючого обладнання, клапанів і засувок технологічного маршруту на зернові культури. Тобто прийемо, що для транспортування зернової продукції з точки А в точку Б необхідно зберегти якість якомога більше продукції, система буде прокладати маршрут перевіряючи можливі варіанти та незагруженість цих маршрутів, якщо маршрут буде вільним то за результатами суми величини коефіцієнта впливу на бій зерна маршрут буде прокладений.

Побудова технологічного маршруту за критерієм $C_{б.мін}$ забезпечить додаткову умову транспортування, за рахунок складання необхідного технічного завдання і внесення змін в керуючу програму формування маршрутів переміщення зерна, що підвищить якість зерна на експорт, однак використовуючи даний критерій, відбувається погіршення в швидкості та економічності технологічного процесу транспортування.

Отже, застосування вказаного принципу у побудові технологічних маршрутів може бути використано для розв'язання завдання створення оптимального маршруту транспортування. Однак в такому маршруті може враховуватися не тільки вказані раніше критерії оптимальності, а й критерії довжини і часу транспортування, що дасть нам можливість підвищити завантаження підприємства. А швидкий процес моделювання оптимального маршруту транспортування, збільшує швидкість завантаження транспортуючого обладнання, що в свою чергу призводить до підвищення ефективності при тих же потужностях. Проте, вирішення даного завдання можливе на основі створення алгоритму багатокритеріальної оптимізації (рис. 5).

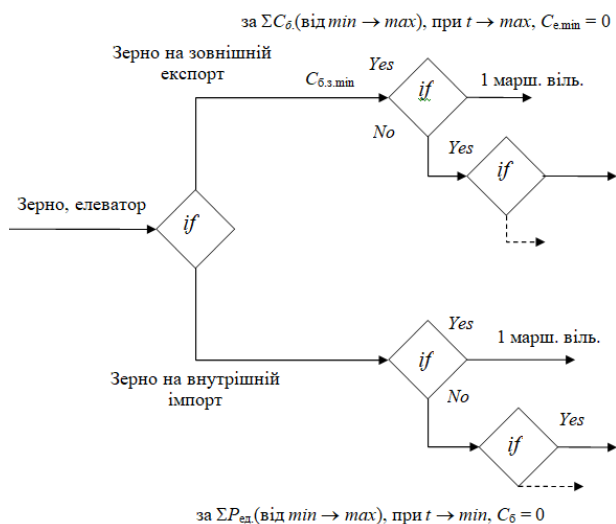


Рисунок 5. Алгоритм вибору прокладання маршруту виходячи з експорту зерна

Використання багатокритеріального підходу у визначенні маршруту транспортування зерна до елеватора дозволяє урахувати та оптимізувати не лише один аспект, а кілька критеріїв одночасно. Цей метод дозволяє збалансувати різні аспекти, такі як експортна якість зерна, мінімізація втрат, довжина маршруту та інші, для досягнення оптимального результату при плануванні та виборі маршруту транспортування.

V. ВИСНОВОК

На основі аналізу функціональної структури керування та алгоритму побудови технологічних маршрутів, визначений напрямок вирішення задачі оптимізації транспортно-технологічних маршрутів, що своєю чергою призведе до підвищення продуктивності і якості технологічного процесу. Для удосконалення процесу маршрутизації технологічного процесу транспортування у елеваторі і підвищення енергоефективності та якості транспортування зерна має сенс розглядати інтеграцію зазначених критеріїв оптимізації разом з урахуванням економічних та технічних обмежень. Задача оптимізації маршрутизації полягає в мінімізації споживання електроенергії під час транспортування зернових культур. Це досягається шляхом використання критерію, що базується на сумарній потужності електроприводів технологічних установок та дозвіл клапанів та засувок, враховуючи їх задіяність в процесі транспортування. Для досягнення показників якості транспортування згідно з критерієм мінімізації втрат зерна, необхідно враховувати фактори, що спричиняють травмування зернової маси, такі як механічні пошкодження під час переміщення засобами транспортування. Обидва критерії мають свою вагому важливість у побудові оптимальних маршрутів транспортування в елеваторних комплексах. Вибір конкретного

критерію може залежати від конкретних потреб та цілей підприємства.

Тому важливо збалансувати різні аспекти, такі як енергоефективність, мінімізація втрат та якість транспортованої продукції, для досягнення найоптимальніших результатів. Таким чином, важливо враховувати енергоефективність, якість та безпеку транспортування зерна, щоб покращити загальну ефективність виробничого процесу в елеваторному комплексі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Конакбаєв О. Б. Автоматизація зерноприймання / О. Б. Конакбаєв, К. І. Мізамова // Вістник науки. – 2021. – Т. 6, № 39. – С. 315–321.
- [2] Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling [Електронний ресурс] / G. Dyck [та ін.] // Smart Agricultural Technology. – 2023. – № 3. – С. 2772–3755. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100079>
- [3] Захарченко Р. Автоматизована система керування процесом сушіння зернових культур: автореф. кандидатская работа / Захарченко Р. – Полтава, 2019. – 24 с.
- [4] О. В. Просяник. Перспективні напрямки розвитку автоматизованих систем на підприємствах зберігання та переробки зерна [Електронний ресурс] / О. В. Просяник, М. О. Просяник, С. М. Ткаченко // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2012. – № 39. – С. 128–136. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2012_39_20
- [5] Люлько Ю. Проблеми та перспективи розвитку хлібоприймальних підприємств та елеваторів / Ю. Люлько // Зернові продукти і комбікорми. – 2016. – Т. 2, № 18. – С. 12–15.
- [6] Кудряшов В. С. Решение задач автоматизации элеваторного комплекса [Електронний ресурс] / В. С. Кудряшов // Вістник ВГУІТ. – 2018. – № 1. – С. 117–123. – Режим доступу: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-1-117-123>
- [7] Підвищення ефективності елеваторної норії [Електронний ресурс] / І. Білюк [та ін.] // 2022 IEEE 4th international conference on modern electrical and energy system, Кременчук. – Кременчук, 2022. – С. 1–5. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005735>
- [8] Мардзяк В. А. Підвищення ефективності технологічного процесу елеваторного комплексу за рахунок оптимальної маршрутизації [Електронний ресурс] / Мардзяк В. А, Тимчук С. О, Сиротенко М. О // Інженерія природокористування. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 82–88. – Режим доступу: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6964706>

- [9] Мардзявко В. А. Аналіз методу маршрутизації транспортно-технологічних ліній переміщення зерна на елеваторах [Електронний ресурс] / В. А. Мардзявко, С. О. Тимчук // Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі : зб. матеріалів доп. учасн. XVII-й Міжнар. форум молоді, Харків. – Харків, 2021. – С. 233–234.
- [10] Система стеження за мікроманіпулятором на основі п'єзоелектричного двигуна [Електронний ресурс] / І. Білюк [та ін.] // 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System, Кременчуг. – Кременчуг, 2023. – С. 1–6. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402375>
- [11] Тимчук С. О. Аналіз транспортування зернової продукції на елеваторах [Електронний ресурс] / С. О. Тимчук, П. М. Кунденко, Л. В. Вахоніна // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2021. – Т. 4, № 112. – С. 96–106. – Режим доступу: [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-4\(112\)-10](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-4(112)-10)
- [12] Спосіб підвищення енергоефективності роботи зернопереробних і зернозберігаючих комплексів : пат. 130996 Україна : G05B 13/00 / М. О. Сиротенко [та ін.]. – № u201804032 ; заявл. 13.04.2018 ; опубл. 10.01.2019, Бюл. № 2006.01.
- [13] Фесун Т. П. Елеваторна промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід [Електронний ресурс] / Т. П. Фесун. – Київ : Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка, 2021. – 180 с. – Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/34263>
- [14] В. Б. Мокін. Розробка інтелектуальних технологій енергозберігаючої оптимізації роботи зернового елеватора з використанням нейромережових моделей та методів навчання з підкріпленням / В. Б. Мокін, М. В. Дратованій, А. Лухверчик // Науковий прогрес: інновації : Міжнар. науково-практ. конф., Мюнхен. – [Б. м.], 2023. – С. 138–144.
- [15] Мардзявко В. Шляхи підвищення якості зерна за рахунок умов транспортування / В. Мардзявко, С. Тимчук // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих уч., Харків. – 2021. – С. 81–84.
- [16] Ilesaliev. Optimization of transport flows of the grain storage / Ilesaliev, Daurenbek, Kobulov // E3S web of conferences. – 2023. – С. 272–278.

Стаття надійшла до редакції 29.01.2024

USE OF CRITERIA FOR PROCESS OPTIMIZATION ELEVATOR COMPLEX ROUTING

- KUNDENKO M.P. Dock. technical Sciences, professor, professor of the department of heat engineering and energy-efficient technologies of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: n.p.kundenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5841-4367;
- MARDZIAVKO V.A. graduate student of the State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vitalijmardzavko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7327-9215;
- RUDENKO A.Y. graduate student of the State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine, e-mail: andrey0911r@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5103-6412;

The goal of the work. The purpose of this work is to describe the optimality criteria for determining the direction of solving the problem of optimizing transport and technological routes of grain products at the elevator complex.

Research methods. An analytical research method was applied to determine the technological characteristics of the elevator complex line and the dependence of the quality of transported products on the constructed transportation route. A mathematical method is applied to describe the constituent elements of the optimization criteria.

Obtained results. One of the directions for increasing and improving the technological process at the elevator was determined, by improving the control algorithms in the direction of optimizing the technological processes of the elevator by many criteria. According to optimization criteria, to ensure optimal transportation conditions, minimum losses, minimum transportation time, minimum energy consumption, and minimum length of the laid transportation path should be used, therefore, a description of the main criteria that can primarily affect the efficiency of the elevator complex was performed.

Scientific news. The direction of solving the problem of optimising transport and technological routes is determined. The analytical derivation of the criterion of minimum energy consumption and the criterion of minimum grain breakage.

Practical value. Optimisation of the elevator complex to ensure variable transportation of grain masses, which

will improve the productivity and quality of the technological process of the elevator complex.

Key words: *minimization of the battle of grain products, minimum energy consumption, software-logic controller, logic equations, elevator complex, routing process.*

REFERENCE

- [1] Konakbaiev, O. B., & Mizamova, K. I. (2021). Automation of grain acceptance. *Herald of science*, 6(39), 315–321. DOI:10.1016/j.atech.2022.100079
- [2] G. Dyck. (2023). Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling. *Smart Agricultural Technology*, (3), 2772–3755. DOI: doi.org/10.1016/j.atech.2022.100079
- [3] Zakharchenko, R. (2019). *Automated control system for grain drying process* [Unpublished extended abstract of candidate's work].
- [4] Prosiyanik, O. V., Prosiyanik, M. O., & Tkachenko, S. M. (2012). Prospective directions for the development of automated systems at grain storage and processing enterprises. *Collection of scientific works of the National Mining University*, (39), 128–136.
- [5] Liulko, Y. (2016). Problems and prospects of the development of grain processing enterprises and elevators. *Cereal Products and Compound Feed*, 2(18), 12–15.
- [6] Kudriashov, V. S. (2018). Solving problems of automation of the elevator complex. *Herald of VGUIT*, (1), 117–123. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-1-117-123
- [7] I. Biliuk, D. Shareiko, O. Savchenko, & S. Havrylov. (2022). Increasing the efficiency of the elevator noria. In *2022 IEEE 4th International conference on modern electrical and energy system* (pp. 1–5). DOI:10.1109/MEES58014.2022.10005735
- [8] Mardziavko V. A, Tymchuk S. O, & Syrotenko M. O. (2021). Increasing the efficiency of the technological process of the elevator complex due to optimal routing. *Nature management engineering*, 22(4), 82–88. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.6964706
- [9] V. A. Mardziavko & S. O. Tymchuk. (2021). Analysis of the routing method of transport and technological lines of grain movement on elevators. In *Youth and agricultural machinery in the 21st century* (pp. 233–234).
- [10] I. Biliuk, D. Shareiko, O. Savchenko, & S. Havrylov. (2023). Piezoelectric motor-based micromanipulator tracking system. In *5th international conference on modern electrical and energy system* (pp. 1–6). DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402375
- [11] S. O. Tymchuk, P. M. Kundenko, & L. V. Vakhonina. (2021). Analysis of transportation of grain products on elevators. *Herald of Agrarian Science of the Black Sea Region*, 4(112), 96–106. DOI: 10.31521/2313-092X/2021-4(112)-10
- [12] A method of increasing the energy efficiency of grain processing and grain storage complexes (Patent of Ukraine No. 130996). (2019).
- [13] T. P. Fesun. (2021). *Elevator industry: traditions and innovations. Domestic and international experience*. National University of Food technology.
- [14] V. B. Mokin, M. V. Dratovanyi, & A. Lukhverchyk. (2023). Development of intelligent technologies for energy-saving grain elevator operation optimization using neural network models and reinforcement learning methods. In *Scientific progress: Innovations* (pp. 138–144).
- [15] V. Mardziavko & O. Tymchuk. (2021). Ways to improve grain quality due to transportation conditions. In *Computer-integrated technologies for automation of technological processes in transport and production* (pp. 81–84).
- [16] Ilesaliev, Daurenbek, & Kobulov. (2023). Optimization of transport flows of the grain storage. In *E3S web of conferences* (pp. 272–278).

УДК 621.23.14

ПОНОВЛЕННЯ РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ УНОРМУВАННЯ ПИТОМИХ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ

ДРЕШПАК Н.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: dreshpak.n.s@nmu.one.

Мета роботи. Розробити спосіб поновлення регресійної моделі для унормування питомих витрат енергії при наявності частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу.

Методи дослідження. Аналіз існуючих способів поновлення регресійних моделей, співставлення їх можливостей, синтез способу поновлення моделі в умовах частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу.

Отримані результати. Встановлено, що при наявності значної кількості можливих варіантів структурних і режимних змін в енергоспоживанні об'єкту контролю введення в регресійну модель супутніх змінних є проблематичним, так як потребує збільшення кількості експериментальних даних в умовах їх очікуваної неоднорідності. Розкрито недолік відомої регресійної моделі для унормування електроспоживання об'єкта контролю, який полягає у тому, що модель не враховує значень останніх в послідовності їх появи експериментальних даних, отриманих у процесі контролю енергоефективності. Це знижує точність прогнозованих значень енергоспоживання. Запропоновано здійснювати поновлення регресійної моделі щоразу після виконання контролю енергоефективності і здійснення коригування вибірки. Коригування реалізують шляхом перевірки однорідності отриманих експериментальних даних з наступним приєднанням їх до елементів існуючої вибірки та вилученням (у разі необхідності) із вибірки застарілих даних. Визначена послідовність коригування вихідних даних дозволяє своєчасно здійснювати поновлення моделі і виконання прогнозу питомого енергоспоживання, вводячи дані, що відображають останні зміни, які відбулися в енергозабезпеченні об'єкта. Запропонований спосіб поновлення моделі реалізує наближення в часі моменту контролю енергоефективності до моментів отримання експериментальних даних для побудови регресійної залежності для унормування значень енергоспоживання. Це сприяє підвищенню точності прогнозу унормованих значень. Суттєва зміна умов виробництва продукції з порушенням однорідності даних супроводжується переходом в перехідний режим коригування, де пропонується зменшувати кількість елементів існуючої вибірки, забезпечуючи послідовне вилучення найбільш віддалених від наступного моменту контролю елементів. Вилучення продовжують до досягнення однорідності даних. При щоденному контролі ефективності споживання електричної енергії зміна значень коефіцієнтів регресійної моделі в процесі її поновлення відображає зміни в електроспоживанні об'єкта, які відбулися за останню добу. Це дозволяє відокремити їх вплив від впливу змін, що сталися раніше та оцінити рівень цього впливу.

Наукова новизна. Вперше визначені недоліки існуючих способів поновлення регресійних моделей в умовах частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу. Розроблено спосіб поновлення моделі в цих умовах, що передбачає коригування вибірки експериментальних даних шляхом зміни кількості її елементів, перевірку однорідності даних.

Практична цінність полягає у визначенні послідовності дій при реалізації розробленого способу поновлення регресійної моделі, що дозволяє підвищити точність розрахунку унормованих значень питомого енергоспоживання.

Ключові слова: контроль енергоефективності; унормування енергоспоживання; регресійна модель; коригування вибірки; питомі витрати енергії.

I. ВСТУП

Для унормування рівня питомих витрат енергії при виконанні контролю енергоефективності виробничих процесів часто використовують регресійні моделі [1]-[3]. Унормовані значення енергоспоживання отримують в результаті аналізу експериментальних даних, що характеризують рівні витрат енергії і їх залежність від змін умов протікання виробничого процесу. Регресійні залежності орієнтовані на визначення середніх значень питомого енергоспоживання, характерного для існуючих в момент прогнозу умов протікання технологічного процесу. Контроль енерго-

ефективності виробничого процесу передбачає зіставлення фактичних значень питомого енергоспоживання з унормованими (прогнозованими) значеннями, отриманими з регресійної залежності. Виходячи з цього, існує необхідність забезпечення прийнятної точності визначення унормованих значень, що сприятиме підвищенню достовірності контролю і покращить можливості для якісного управління енергоефективністю [1]. При використанні регресійних моделей точність розрахунку нормованих значень значною мірою залежить від виду регресійної моделі, а також порядку отримання експериментальних даних для її побудови. Задіяна вибірка даних повинна враховува-

ти зміни, що відбулися на об'єкті контролю. В умовах ринкової економіки, де процес виробництва продукції часто змінюється і удосконалюється, процес прогнозування унормованих значень показників енергоспоживання ускладнюється. Виникає необхідність урахування цих змін. Орієнтуючись на наявність частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу, в [3] запропоновано здійснювати унормування питомого енергоспоживання, використовуючи регресійну модель змінної структури, що передбачає зміну коефіцієнтів лінійної регресійної залежності. Зміна умов виробничого процесу повинна супроводжуватись коригуванням (змінюючи складу) вибірки вихідних даних для побудови регресійної залежності і відповідним поновленням (змінюючи структуру) моделі. Коригування вибірки даних повинно бути своєчасним, тобто здійснюватися без затримки відносно терміну зміни умов виробничого процесу, що підвищить точність визначення унормованих значень. В публікації [3] наголошується на можливості використання однофакторних регресійних моделей. Запропоновано в однофакторних лінійній та нелінійній моделях використовувати значення обсягу випуску продукції, як комплексної характеристики, що визначає рівень споживання енергії.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відомі різні підходи до поновлення регресійної моделі при зміні ситуації на об'єкті контролю. Для цього, наприклад, в регресійну модель включають «супутні якісні змінні Z » [4]. Розглянемо наступну ситуацію. Регресійна залежність для унормування питомого електроспоживання об'єкта має вигляд

$$\hat{W} = Q_0 + Q_1 \cdot X, \quad (1)$$

де \hat{W} – оцінка середнього значення щоденного питомого споживання електроенергії; Q_0, Q_1 – коефіцієнти регресійної моделі (постійна Q_0 та змінна Q_1 складові). Залежність (1) отримують за результатами експериментальних даних окремої вибірки $\tilde{B}_n = \{(X_1, W_1), (X_2, W_2), \dots, (X_n, W_n)\}$. Дані вибірки фіксують в певних проміжках часу. Таким чином, індекс « n » характеризує послідовність їх реєстрації в часі. Зрозуміло, що значення коефіцієнтів Q_0, Q_1 обумовлені статистичними даними цієї вибірки і відповідають умовам енергоспоживання об'єкта, які існували протягом періоду збору експериментальних даних. Зміна умов споживання енергії, що пов'язана із структурними і режимними змінами, які відбуваються в межах об'єкту контролю, приводить до наступних наслідків. Нова вибірка щоденних даних, отриманих протягом певного періоду часу, забезпечить зміну коефіцієнтів регресійної залежності (1). Якщо використання даних сусідніх вибірок приводять

до зміни коефіцієнтів Q_0, Q_1 , то користуються моделлю зі змінною структурою. Причиною зміни коефіцієнтів Q_0, Q_1 є наявність супутніх якісних змінних Z , які впливають на значення коефіцієнтів [4]

$$\hat{W} = Q_0(Z) + Q_1(Z) \cdot X. \quad (2)$$

Будемо вважати, що вплив Z на значення питомого споживання енергії W не приводить до появи нелінійності в рівнянні (2). Дія неврахованих супутніх змінних проявляється виключно в зміні значень коефіцієнтів Q_0, Q_1 . Зрозуміло, що при стабільних значеннях Z (при відсутності змін в умовах виробництва продукції) структура регресійної моделі не змінюється. Слід звернути увагу на те, що на відміну від пояснюючих змінних регресійної моделі, які підлягають обов'язковому вимірюванню, супутні зміні не вимірюють. Фіксують тільки їх наявність (як якісних змінних) і розраховують ступінь їх впливу на значення коефіцієнтів регресійної моделі [4]. Якщо моменти уведення в дію супутніх змінних відомі, то в регресійну модель вводять манекенні змінні, які діють у визначених термінах часу і, таким чином, змінюють структуру регресійної моделі. Суттєвою перевагою використання супутніх змінних є відсутність вимірювань їх значень, тобто фіксується тільки наявність або відсутність дії змінної, що здійснюють уведенням в регресійну модель значень 1 або 0. Недолік їх уведення в регресійну модель полягає у тому, що збільшується кількість пояснюючих змінних моделі, що потребує збільшення кількості експериментів для забезпечення статистичної надійності оцінки енергоспоживання [4]. В умовах оперативного контролю і при наявності структурних та режимних змін в електроспоживанні об'єкта з широким переліком можливих варіантів супутніх змін уведення в регресійну модель значної кількості манекенних змінних є проблематичним. Між тим, ідея використання змінних Z заслуговує на увагу завдяки відсутності кількісної оцінки їх значень. При обмежених можливостях вимірювання пояснюючих змінних регресійної моделі для унормування енергоспоживання, використання супутніх змінних Z без їх фактичного уведення в регресійну модель і обов'язкове забезпечення оцінки їх впливу на значення коефіцієнтів регресійного рівняння є прийнятним рішенням, що сприяє підвищенню точності унормування ефективності використання енергії.

Інший підхід до формування регресійної моделі змінної структури полягає у розподілі експериментальних даних на вибірки з однорідними елементами [4]. У цьому випадку для кожної вибірки розраховують відповідні коефіцієнти регресійного рівняння. Близький до цього підхід, який передбачає розподіл даних на окремі вибірки з формуванням на їх основі регресійних моделей, використано в [1] для контролю енергоспоживання ділянки видобутку вугілля.

Фактичні показники енергоспоживання об'єкта використовують як для виконання операції співставлення з унормованими значеннями, так і для побудови поновленої регресійної моделі. Після чергового накопичення експериментальних даних відбувається заміна однієї моделі іншою (поновленою). Поновлена модель використовує ряд отриманих останніми в період контролю експериментальних даних з їх послідовною фіксацією в часі. Принцип побудови моделі зі змінною структурою, де кожна структура діє певний проміжок часу і використовується для унормування електроспоживання об'єкта, розглянуто, наприклад, у відомих роботах [1], [2]. Перехід від однієї моделі до іншої відбувається після накопичення певної кількості експериментальних даних, необхідних для побудови нової регресійної моделі. В цих роботах зроблено припущення про однорідність даних регресійних вибірок, що не завжди виконується при частих змінах умов виробництва. Розподіл даних не передбачає їх перевірку на однорідність, але процес поновлення регресійної моделі реалізується. Рис.1 ілюструє послідовність поновлення регресійної моделі в певних проміжках часу. Контролюючі дії співпадають у часі з накопиченням експериментальних даних для побудови наступної регресійної залежності.

Недолік існуючого підходу полягає у тому, що дані, які використовують для побудови регресійної залежності, не перевіряють на однорідність. Це може привести до зниження точності прогнозу при визначенні унормованих значень енергоспоживання. Виявлення неоднорідності даних повинно слугувати сигналом до зміни структури моделі, що супроводжується суттєвою зміною коефіцієнтів Q_0, Q_1 . Інший недолік розглянутого підходу полягає у тому, що проміжки часу між контролюючими діями і періодом формування регресійної моделі, за допомогою якої здійснюється контроль, можуть бути значними. Затримка контролю особливо відчутна в кінці терміну контролю (див. рис.1). Виходячи з того, що у проміжку часу між введенням в дію регресійної залежності і моментом контролю можливі зміни умов споживання енергії, урахування цих змін не відбувається.

При цьому унормовані значення питомого енергоспоживання не містять складових, зумовлених змі-

нами, які відбулися, що знижує точність їх визначення.

III. МЕТА РОБОТИ

Аналізуючи недоліки відомих методів поновлення регресійної моделі, приходимо до висновку про необхідність зосередження уваги на обґрунтуванні послідовності отримання вибірових даних регресійної моделі для кожної змінної структури, забезпеченні їх однорідності та підвищення точності визначення унормованих значень питомого енергоспоживання в умовах частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу. Дослідження статті спрямовані на вирішення сформульованих завдань.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В процесі контролю енергоефективності процесу при суттєвій зміні умов виробництва продукції і використанні статистичного методу унормування питомого енергоспоживання доцільно здійснювати послідовну реєстрацію в часі вихідних даних, необхідних для побудови регресійної моделі. Характерною ознакою процесів, що протікають в часі, є, як правило, взаємна кореляція залишків регресійної моделі [4]. Прояв взаємного впливу зменшується по мірі взаємної віддаленості в часі спостережень, які розглядаються. При кореляції залишків лінійної регресійної моделі та відсутності гомоскедастичності для розрахунку коефіцієнтів моделі використовують узагальнений метод найменших квадратів [4]. Виконання розрахунку передбачає визначення матриці коваріації вектору регресійних залишків. Виходячи з того, що в статті завдання параметризації регресійної моделі розглядається в загальному вигляді, тобто не стосується конкретної технології виробництва продукції, елементи матриці коваріації, необхідної для визначення коефіцієнтів регресійної моделі, невідомі. Більш того, при суттєвій зміні умов виробничого процесу вид кореляційної залежності може змінюватись, що практично унеможливує застосування цього методу. В цій ситуації авторка роботи пропонує користуватися класичним методом найменших квадратів,

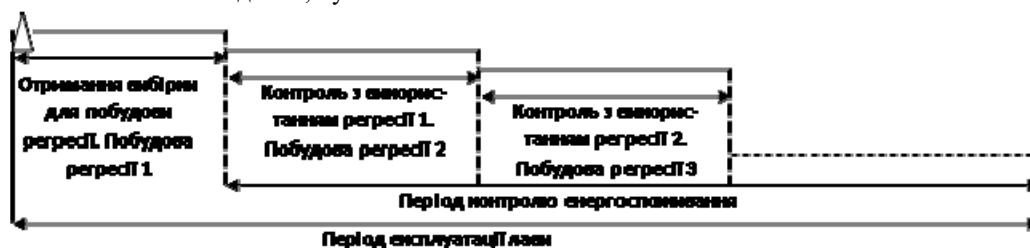


Рисунок 1. Збір даних та побудова регресійних моделей

але при цьому забезпечити наявність у вибірці вихідних даних для побудови моделі значень, максимально наближених в часі до наступного моменту контролю енергоефективності виробничого процесу. Це забезпечить більшу ступінь кореляції їх значень з прогнозованим значенням питомого споживання енергії, необхідним для виконання процедури контролю, дозволить урахувати останні зміни умов виробництва продукції, що сприятиме підвищенню точності визначення унормованих значень. У цьому полягає особливість запропонованого авторкою роботи коригування вибірки вихідних даних регресійної моделі.

Розглянемо послідовність дій при виконанні запропонованого способу коригування (зміни) значень вибірки експериментальних даних для побудови регресійної залежності на кожному кроці контролю. Вихідні дані (\tilde{B}_n), використані для побудови діючої регресійної моделі, розташовують (упорядковують) в послідовності їх отримання в часі при виконанні контролю енергоефективності

$$\tilde{B}_n = \{(X_1, W_1), (X_2, W_2) \dots (X_n, W_n)\}. \quad (3)$$

Будемо вважати, що існуюча вибірка (3) містить однорідні дані. Регресійна залежність, побудована за даними вибірки (3), використана для унормування значення питомих витрат енергії на $(n+1)$ кроці процесу контролю. На цьому кроці контролю з'являються нові експериментальні дані (X_{n+1}, W_{n+1}) . Для отримання поновленої регресійної залежності, необхідної для унормування енергоспоживання на наступному кроці контролю $(n+2)$, здійснимо коригування вибірки даних (3). Для цього розглянемо можливість об'єднання вибірки (3) з щойно отриманими даними (X_{n+1}, W_{n+1}) . При цьому розгляду підлягає варіант об'єднання, що відповідає збереженню всіх елементів вибірки (3), а також варіант вилучення її значень, найбільш віддалених від моменту контролю процесу на наступному кроці $(n+2)$ (обидва варіанти будуть докладно розглянуті нижче). Таким чином, в результаті проведення дій по об'єднанню вибірок, отримуємо об'єднану вибірку з елементами, відмінними від складу існуючої вибірки. Вилучення та уведення нових вихідних даних щоразу супроводжується побудовою поновленої регресійної моделі. Рис. 2 ілюструє замкнутий цикл дій, що виконуються щоразу в процесі контролю енергоефективності і спрямовані на поновлення регресійної залежності.

Ясно, що період формування вихідних даних для побудови поновленої моделі, який розглядається, є менш віддаленим від наступного моменту контролю (крок $(n+2)$), ніж це спостерігається у випадку, який ілюструє рис.1.



Рисунок 2. Алгоритм поновлення регресійної залежності для унормування споживання електроенергії

Це досягається тим, що поновлення регресійної залежності здійснюється щоразу після виконання чергового контролю і загальна кількість поновлень моделі зростає. Запропонована процедура поновлення дозволяє увести в регресійну модель інформацію, щойно отриману в результаті проведеного контролю. Рис. 3 ілюструє запропонований підхід до формування регресійної моделі. Переміщення в часі контролюючих дій супроводжується аналогічним переміщенням періоду формування вибірових даних для побудови регресійної залежності, яка забезпечує прогнозування унормованих значень енергоспоживання.

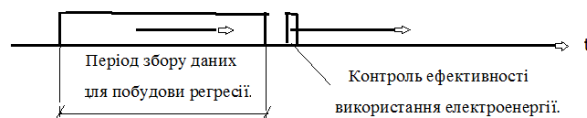


Рисунок 3. Зв'язок моменту контролю енергоефективності з періодом формування даних для побудови регресійної залежності

Коригування вихідних даних для побудови поновленої регресії може супроводжуватись втратою однорідності даних. Поява неоднорідних з існуючою вибіркою (3) даних, отриманих на $(n+1)$ кроці контролю і зумовлених змінами енергоспоживання об'єкта, приводить до суттєвої зміни структури поновленої регресійної моделі, що супроводжується значною зміною коефіцієнтів Q_0 та Q_1 . Слід звернути увагу на те, що втрати однорідності даних при об'єднанні вибірок, як це показано [4], відбувається при суттєвих змінах цих коефіцієнтів. Уточнення є слушним, так як кожне уведення в регресійну модель нових експериментальних даних також, як правило, приводить до зміни значень Q_0 та Q_1 . Відрізняється ступінь їх зміни. Так, в [4] показано, що якщо таке уведення даних не приводить до зміни коефіцієнтів в рамках похибки їх визначення, то ці дані можна вважати однорідними. Можливість об'єднання однорідних даних в одну вибірку визначають також за допомогою критерія Г. Чоу [5]. Розглянемо цей критерій з метою його застосування в процесі коригування вибірових даних. Значення критичної статистики $\gamma_{n,n1}$ визначають за

формулою

$$\gamma_{n,n1} = \frac{(\hat{\epsilon}^T \cdot \hat{\epsilon} - \hat{\epsilon}^{(1)T} \cdot \hat{\epsilon}^{(1)} / n2)}{(\hat{\epsilon}^{(1)T} \cdot \hat{\epsilon}^{(1)}) / n1 - p - 1}, \quad (4)$$

де $\hat{\epsilon}$, $\hat{\epsilon}^{(1)}$ – вектори нев'язок об'єднаної та існуючої вибірок; $n1$, $n2$, n – кількість спостережень існуючої, приєднаної та об'єднаної вибірок відповідно ($n=n1+n2$); P – кількість пояснюючих змінних регресійної моделі.

При сумісному розгляді змісту викладеної вище процедури коригування даних на кожному кроці контролю енергоефективності з перевіркою об'єднаної вибірки на однорідність її даних отримуємо наступні значення змінних в формулі (4): $p=1$, $n2=1$, які відповідають випадку застосування одно факторної лінійної регресійної моделі зі зміною значень існуючої вибірки і отриманням на цій основі об'єднаної вибірки. Існуюча вибірка, задіяна в залежності (4) з кількістю спостережень $n1$, враховує зміну складу вибірки (3) на кожному $(n+1)$ кроці контролю. Можливість об'єднання вихідних даних існуючої вибірки ($n1$) та приєднаної вибірки X_{n+1}, W_{n+1} ($n2$) для отримання об'єднаних даних (n) підтверджується, якщо значення $\gamma_{n,n1} \leq F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1)$. Тут

$F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1) - 100 \cdot \alpha, \%$ – точка F розподілення з числами ступенів свободи чисельника та знаменника, рівними відповідно $n2$ та $n1 - p - 1$; α – заданий рівень значущості критерію [5]. Поява неоднорідних експериментальних даних свідчить про суттєву зміну умов виробничого процесу. У цьому випадку отримані неоднорідні дані не приєднують до існуючої вибірки. В той же час, існує можливість подальшого коригування існуючої вибірки ($n1$) шляхом зменшення кількості її елементів з метою забезпечення однорідності даних об'єднаної вибірки. Покажемо таку можливість.

Можливість об'єднання двох вибірок експериментальних даних значною мірою залежить від табличного значення $F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1)$. В табл.1 наведено залежність значення $F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1)$ від числа ступенів свободи знаменника ($n1 - p - 1$) при визначених вище значеннях $n2, p$ та $\alpha = 0,05$.

Видно, що зміна кількості елементів існуючої вибірки $n1$ суттєво впливає на значення F_{α} . Зменшення їх кількості супроводжується збільшенням значення F_{α} і, відповідно, зменшенням можливості підтвердження неоднорідності даних.

Таблиця 1. Залежність $F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1)$ від числа ступенів свободи знаменника ($n1 - p - 1$) при $n2=1, p=1$ та $\alpha = 0,05$.

F_{α}	161	6,61	4,96	4,54	4,35	4,24	4,17	4,08	4,00	3,92
$n1-2$	1	5	10	15	20	25	30	40	60	120

Таким чином, при наявності неоднорідності в даних об'єднаної вибірки (в процесі коригування вибірових даних) необхідно шляхом вилучення змен-

шувати кількість елементів існуючої вибірки $n1$ з метою отримання такої їх кількості, що забезпечить виконання наведеної вище умови однорідності.

Повернемося до розгляду варіантів зміни існуючої вибірки (3) при її об'єднанні з приєднаною вибіркою (X_{n+1}, W_{n+1}). Якщо вибірку (3) не змінювати, то кількість елементів коригованої об'єднаної вибірки збільшиться на 1. Аналогічне збільшення буде спостерігатися на кожному наступному кроці контролю. Таким чином, розмір об'єднаної вибірки в процесі контролю буде зростати. Процес коригування, пов'язаний із зміною розміру об'єднаної вибірки, будемо вважати «перехідним режимом» на відміну від режиму зі стабільним розміром, який назвемо «усталеним режимом». Збільшення розміру об'єднаної вибірки в процесі контролю сприяє підвищенню статистичної надійності визначення нормованого значення питомого енергоспоживання [4]. Звуження довірчого інтервалу i , відповідно, підвищення точності визначення прогнозованого значення досягається збільшенням кількості елементів вибірки. Характерно, що інтенсивність звуження зменшується при суттєвому збільшенні кількості елементів. В той же час, збільшення кількості елементів об'єднаної вибірки сприяє зростанню проміжку часу між моментами отримання початкових значень вибірки (3) (наприклад, $(X_1, W_1), (X_2, W_2) \dots$) і моментом контролю на $(n+2)$ кроці, що, як показано вище, сприяє зниженню точності прогнозу. Тому доцільно встановити обмеження максимальної кількості елементів об'єднаної вибірки з урахуванням міркувань відносно її статистичної надійності та прийнятної точності прогнозу унормованих значень енергоспоживання. Збільшення кількості елементів вибірки є доцільним у випадку, коли умови виробничого процесу змінюються поступово. При частих змінах умов виробництва продукції необхідно зменшувати кількість елементів. Аналіз свідчить про те, що прийнятним є обмеження кількості елементів вибірки в інтервалі 10 – 30 значень.

Перейдемо до розгляду варіанту вилучення значень елементів вибірки (3), найбільш віддалених від моменту контролю процесу на наступному кроці ($n+2$). Якщо вилученню підлягає значення (X_1, W_1) , то об'єднана вибірка має вигляд

$$\tilde{B}_n = \left\{ (X_2, W_2), (X_3, W_3) \dots (X_n, W_n), \right. \\ \left. (X_{n+1}, W_{n+1}) \right\}. \quad (5)$$

Завдяки уведенню в об'єднану вибірку значення (X_{n+1}, W_{n+1}) вона має такий же розмір, як і існуюча вибірка (3), тобто в процесі коригування вибірки її розмір не змінюється і забезпечується усталений режим коригування, де кількість елементів об'єднаної вибірки є стабільною і відповідає встановленому обмеженню на її розмір (від 10 до 30 значень). В кожно-

му із розглянутих варіантів зміни існуючої вибірки (3) слід аналізувати можливість її об'єднання з приєднаною вибіркою, користуючись залежністю (4). Однорідність даних об'єднаної вибірки повинна підтверджуватись на кожному кроці контролюючих дій. Якщо однорідність даних порушується, що цілком можливо при наявності частих змін умов виробництва продукції, то пропонується зменшувати кількість елементів існуючої вибірки (3), забезпечуючи послідовне вилучення найбільш віддалених від наступного моменту контролю елементів (спочатку (X_1, W_1) , далі (X_2, W_2) і наступні значення). Вилучення продовжують до досягнення однорідності даних. Кількість вилучених елементів може бути значною, що суттєво знизить статистичну надійність об'єднаної вибірки. В той же час, цей підхід до відновлення однорідності даних можна вважати вдалим рішенням, так як при відмові від його застосування виникає необхідність припинення контролю енергоефективності на термін формування нової вибірки експериментальних даних. Після відновлення однорідності даних процес коригування може розвиватися як в напрямку збільшення кількості елементів об'єднаної вибірки і виходу на усталений режим, так і роботи в перехідному режимі, де вибірка буде мати максимальну кількість елементів, яка забезпечить однорідність даних.

Запропонований спосіб коригування кількості елементів об'єднаної вибірки слід доповнити визначенням порядку коригування на початковому етапі контролю. На початку контролю кількість елементів вибірки дорівнює нулю. Тому необхідно забезпечити мінімальну кількість експериментальних даних, необхідних для здійснення першого кроку перевірки однорідності даних. Із табл. 1 видно, що мінімальна кількість даних існуючої вибірки повинна бути $n-1=3$. Тоді значення $F_\alpha=161$, що практично гарантує однорідність даних об'єднаної вибірки, отриманої в результаті приєднання даних, визначених на четвертому кроці контролю. Очевидно, що наступні кроки коригування об'єднаної вибірки необхідно спрямувати на збільшення кількості її елементів, що відповідає розглянутому вище перехідному режиму коригування. Якщо на кожному кроці перехідного режиму підтверджується однорідність даних, то процес розширення вибірки завершується досягненням максимальної кількості елементів (дорівнює уведеному обмеженню). Далі реалізується усталений режим коригування з можливим переходом в перехідний при виникненні неоднорідності даних. Слід звернути увагу на те, що на початку виконання контролюючих дій, а також при виникненні неоднорідності даних кількість елементів об'єднаної вибірки скорочується, що, (як показано в [4]), супроводжується розширенням меж довірчого інтервалу при визначенні середнього значення питомих витрат енергії і впливає на точність унормування показника енергоефективності. Більшу стабільність меж довірчого інтервалу слід очікувати в усталеному режимі коригування, де кількість елементів вибірки

залишається незмінною. Це слід віднести до переваг усталеного режиму у випадку, коли в процесі контролю необхідно забезпечити незначні коливання похибки визначення унормованих значень.

Таким чином, запропонований спосіб коригування об'єднаної вибірки передбачає зміну в процесі контролю енергоефективності кількості елементів вибірки, чергування перехідних і стаціонарних режимів коригування. При цьому суттєва зміна умов виробництва продукції, що супроводжується порушенням однорідності даних, передбачає перехід в перехідний режим коригування, де пропонується зменшувати кількість елементів існуючої вибірки, забезпечуючи послідовне вилучення найбільш віддалених від наступного моменту контролю елементів. Вилучення елементів продовжують до досягнення однорідності даних.

Зосередимося на усталеному режимі коригування вибірки (3). Кожна наступна контролююча дія супроводжується вилученням із переліку упорядкованих вихідних даних цієї вибірки найбільш віддалених в часі фактичних значень пояснювальної та пояснюючої змінних і введенням в цей перелік нових, щойно отриманих значень цих змінних. Отримаємо вибірку (5). Значення змінних X_{n+1}, W_{n+1} отримані в результаті контролю, який відбувся першим після введення в дію вибірки Q_0 та Q_1 .

При використанні для побудови регресійної моделі методу найменших квадратів значення коефіцієнтів Q_0 та Q_1 (відповідають вибірці \tilde{B}_n) отримують з відомих формул [1]

$$Q_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i \cdot W_i - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n W_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2};$$

$$Q_0 = \frac{\sum_{i=1}^n W_i - Q_1 \cdot \sum_{i=1}^n X_i}{n}. \quad (6)$$

Із залежностей (6) видно, що послідовність в розташуванні експериментальних даних у вибірці \tilde{B}_n не впливає на значення коефіцієнтів Q_0 та Q_1 , тобто моменти отримання цих даних не є суттєвими. При побудові поновленої регресійної моделі (вибірка (5) \tilde{B}_n) важлива послідовність отримання даних в часі. Відповідні значення коефіцієнтів Q_0' та Q_1' отримаємо з формул

$$Q_1' = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n X_i \cdot W_i - X_1 \cdot W_1 + X_{n+1} \cdot W_{n+1} \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i - X_1 + X_{n+1} \right)}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n X_i^2 - X_1^2 + X_{n+1}^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i - X_1 + X_{n+1} \right)^2} \times \frac{\sum_{i=1}^n W_i - W_1 + W_{n+1}}{1}; \quad (7)$$

$$Q_0' = \frac{\sum_{i=1}^n W_i - W_1 + W_{n+1} - Q_1' \left(\sum_{i=1}^n X_i - X_1 + X_{n+1} \right)}{n}.$$

Якщо $X_1=X_{n+1}$ і $W_1=W_{n+1}$, то значення коефіцієнтів діючої та поновленої моделей однакові ($Q_0 = Q_0'$, $Q_1 = Q_1'$). Залежності (6) та (7) дозволяють оцінити ступінь коригування коефіцієнтів на кожному кроці контролюючих дій

$$\Delta Q_0 = Q_0 - Q_0'; \quad (8)$$

$$\Delta Q_1 = Q_1 - Q_1'.$$

Перевага запропонованого підходу поновлення регресійної моделі в співставленні з відомим (рис. 1) полягає у тому, що на кожному кроці контролю співставлення фактичних показників енергоспоживання здійснюється з унормованими значеннями, які враховують структурні і режимні зміни, що відбулися на об'єкті протягом усіх попередніх контролюючих дій. Це є важливою особливістю запропонованого підходу до контролю, так як вона дозволяє зафіксувати і оцінити рівень змін в енергоспоживанні, які відбулися безпосереднього на останньому етапі контролю. Зважаючи на те, що контроль пропонується здійснювати щоденно, існує можливість фіксації змін, що відбуваються на об'єкті протягом доби з визначенням їх якісного змісту (визначенням причини зміни рівня енергоспоживання, наприклад, шляхом опитування керівників виробничих підрозділів з використанням телефонного зв'язку), а також кількісної оцінки їх впливу. Очевидно, що запропонований підхід близький за змістом до використання якісних супутніх змінних [4]. Але визначення змінних не супроводжується їх уведенням в регресійну модель. Кількісна оцінка впливу цих змінних визначається різницею між фактичними і нормативними значеннями споживання енергії. Інформація є важливою для прийняття вірних рішень в управлінні енергоспоживанням об'єкту за результатами оперативного контролю.

V. ВИСНОВКИ

1. При наявності значної кількості можливих варіантів структурних і режимних змін в енергоспоживанні об'єкту контролю уведення в регресійну модель супутніх змінних є проблематичним, так як потребує збільшення кількості експериментальних даних в умовах їх очікуваної неоднорідності.

2. Недолік відомої регресійної моделі для унормування електроспоживання об'єкта контролю полягає у

тому, що модель не враховує значень останніх в послідовності їх появи експериментальних даних, отриманих у процесі контролю енергоефективності. Це знижує точність прогнозованих значень енергоспоживання. Крім того, введено припущення про однорідність даних вибірки, що при частих змінах умов виробництва продукції не завжди виконується і вносить додаткову похибку в результат прогнозу.

3. Запропоновано здійснювати поновлення регресійної моделі щоразу після виконання контролю енергоефективності і здійснення коригування вибірки. Коригування здійснюють шляхом перевірки однорідності отриманих експериментальних даних з наступним приєднанням їх до елементів існуючої вибірки та вилученням (у разі необхідності) із вибірки застарілих даних. Така послідовність коригування вихідних даних дозволяє своєчасно здійснювати поновлення моделі і виконання прогнозу питомого енергоспоживання, вводячи дані, що відображають останні зміни, які відбулися в енергозабезпеченні об'єкта. Запропонований спосіб поновлення моделі реалізує наближення в часі моменту контролю енергоефективності до моментів отримання експериментальних даних для побудови регресійної залежності для унормування значень енергоспоживання. Це сприяє підвищенню точності прогнозу унормованих значень.

4. Процес коригування, пов'язаний із зміною розміру об'єднаної вибірки, запропоновано вважати «перехідним режимом» на відміну від режиму зі стабільним розміром, який названо «усталеним режимом». Запропонований спосіб коригування об'єднаної вибірки передбачає чередування перехідних і усталених режимів. При цьому суттєва зміна умов виробництва продукції з порушенням однорідності даних супроводжується переходом в перехідний режим коригування, де пропонується зменшувати кількість елементів існуючої вибірки, забезпечуючи послідовне вилучення найбільш віддалених від наступного моменту контролю елементів. Вилучення продовжують до досягнення однорідності даних.

5. При щоденному контролі ефективності споживання електричної енергії зміна значень коефіцієнтів регресійної моделі в процесі її поновлення відображає зміни в електроспоживанні об'єкта, які відбулися за останню добу. Це дозволяє відокремити їх вплив від впливу змін, що сталися раніше та оцінити рівень цього впливу. Існує можливість визначення змісту (причин виникнення) останніх змін, що розширює інформаційні можливості контролю, сприяє підвищенню його оперативності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення: навч. посібник/ Г.Г. Півняк, С.І. Випанасенко. О.І. Хованська, Ю.В. Хацкевич, Н.С. Дрешпак. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 214 с.
- [2] Vypanasenko, S., Dreshpak, N. (2015) Informational and methodological support for energy efficiency

- control Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, 2, 53-57.
- [3] Dreshpak, N., Dreshpak, O. (2023) Parametrization of the statistical model for electrical energy efficiency control *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 96-102. Retrieved from <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/096>.
- [4] Айвазян С.А. Методы эконометрики/ С.А. Айвазян.– М.: Магистр: ИНФРА-М, 2010. – 512с.
- [5] Літнарівч Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу: навчальний посібник/ Р.М. Літнарівч; МEGУ.– Рівне, 2011. –140 с.
- [6] Dreshpak, O.S, Dreshpak, N.S., & Vypanasenko, S.I. (2022). Technology of Raw Materials Enrichment of Inhomogeneous Carbonate Deposits and Evaluation of its Energy Efficiency: Multi-authored: Monograph. Romania: UNIVERSI-TAS Publishing. Retrieved from <https://doi.org/10.31713/m1107>.
- [7] Закон України «Про енергозбереження»: прийнятий постановою Верховної Ради України № 75/94-ВР від липня 1994 р./ М-во юстиції України. – К. : Ін Юре, 1994. – 283 с.
- [8] Методика визначення нераціонального (неефективного) використання паливно-енергетичних ресурсів: методичні рекомендації/ Національне агентство України з питань ефективного використання енергетичних ресурсів. – Київ, 2009. – 25 с.
- [9] В Україні прийнято національні стандарти з енергоаудиту та енергетичного менеджменту відповідно до європейських норм [Електронний ресурс]: сайт Держенергоефективності, 2016. – Режим доступу: <http://sae.gov.ua/uk/news/1184> (дата звернення: 26.09.2023).
- [10] Впровадження стандарту систем енергоменеджменту в промисловості України [Електронний ресурс]: сайт проекту UNIDO/GEF, 2015. Режим доступу: <http://www.ukriee.org.ua/uk/proekt/meta-proekta> (дата звернення: 26.09.2023).
- [11] Шулле Ю. А. Використання АСКОВЕ для підвищення ефективності енерговикористання на промислових підприємствах / Ю.А. Шулле, І.С. Розянський// Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2016.– № 1.– С. 59-63.
- [12] Кодекс комерційного обліку електричної енергії. №311§. розд. I п. 1.2. [Електронний ресурс]: сайт Верховної Ради України, 2018. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text> (дата звернення: 26.09.2023).
- [13] Pothina, R., & Kesojevic, V. (2007). A Gyrotory Crusher Model and Impact Parameters Related to Energy Consumption. *Minerals and Metallurgical Processing*, 24(3), 170-180.
- [14] Aslaksen, E. (2008) Designing complex systems. Foundations of design in the functional domain. Auerbach publications, 176.
- [15] Barrera, D., Diaz, M. (2011) Communicating systems with UML 2. Modeling and analysis of network protocols. ISTE ltd, 268.
- [16] Boehm, B. (2010) A spiral model of software development and enhancement. Object management group, 180.
- [17] Palekhova, L., & Simon, S. (2016). Competitive advantages through the implementation of international energy management standards. *Bulletin of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture*, 3, 42-51. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Competitiveadvantages-through-the-implementation-PaliekhovaSimon/9c1feb73e964bc8b5c3b9fbabd81d4484fb>

Стаття надійшла до редакції 06.12.2023

RENEWAL OF THE REGRESSION MODEL FOR NORMALIZATION OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION

DRESHPAK Ph.D, associate professor, associate professor of electrical engineering department at Dnipro N.S. University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: dreshpak.n.s@nmu.one.

Purpose. To develop a method of updating the regression model for the normalization of specific energy consumption in the presence of frequent and significant changes in the energy efficiency of the production process.

Methodology. Analysis of existing methods of updating regression models, comparison of their possibilities, and synthesis of the method of updating the model in conditions of frequent and significant changes in the energy efficiency of the production process.

Findings. It was established that in the presence of a significant number of possible variants of structural and mode changes in the energy consumption of the control object, the introduction of associated variables into the regression model is problematic, as it requires an increase in the number of experimental data in conditions of their expected heterogeneity. The flaw of the well-known regression model for normalizing the power consumption of the object of control is revealed, which consists of the fact that the model does not take into account the last values in the sequence of their appearance of experimental data obtained in the process of energy efficiency control. This reduces the accuracy of predicted energy consumption values. It is proposed to update the regression model every time after performing the energy efficiency control and sample adjustment. Adjustments are implemented by checking the homogeneity of the obtained experimental data, followed by their addition to the elements of the existing sample and removal (if necessary) from the sample of outdated data. The defined sequence of adjustment of the initial data allows timely updating of the

model and implementation of the forecast of specific energy consumption, entering data reflecting the latest changes that occurred in the facility's energy supply. The proposed method of updating the model implements the approximation in time of the moment of energy efficiency control to the moment of obtaining experimental data for building a regression dependence for normalizing energy consumption values. This helps to increase the accuracy of the forecast of normalized values. A significant change in the conditions of production of products with a violation of the homogeneity of data is accompanied by a transition to the transitional mode of adjustment, where it is proposed to reduce the number of elements of the existing sample, ensuring the sequential removal of the elements furthest from the next moment of control. Extraction continues until data homogeneity is achieved. During the daily control of the efficiency of electricity consumption, the change in the values of the regression model coefficients in the process of its renewal reflects the changes in the object's electricity consumption that occurred over the last day. This allows you to separate their impact from the impact of changes that occurred earlier and to assess the level of this impact.

Originality. For the first time, the shortcomings of the existing methods of updating regression models in the conditions of frequent and significant changes in the energy efficiency of the production process were identified. A method of updating the model under these conditions has been developed, which involves adjusting the sample of experimental data by changing the number of its elements and checking the homogeneity of the data.

Practical value is that the sequence of actions during the implementation of the developed method of updating the regression model is defined, which allows for an increase in the accuracy of calculating the normalized values of specific energy consumption.

Keywords: energy efficiency control; normalization of energy consumption; regression model; sample adjustment; specific energy consumption.

REFERENCES

- [1] Pivniak, H.H., Vypanasenko, S.I., Khovanska, O.I., Khatskevych, Yu.V., Dreshpak, N.S. (2013). Systemy enerhomenedzhmentu ta yikh matematychno zabezpechennia. D.: Natsionalnyi hirnychyi universytet, 214.
- [2] Vypanasenko, S., Dreshpak, N. (2015) Informational and methodological support for energy efficiency control Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, 2, 53-57.
- [3] Dreshpak, N., Dreshpak, O. (2023) Parametrization of the statistical model for electrical energy efficiency control Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 4, 96-102. Retrieved from <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/096>.
- [4] Aivazian, S.A. (2010). Metody ekonometryky. M.: Mahystr: YNFRA-M, 512 (in Russian).
- [5] Litnarovych, R.M. (2011). Pobudova i doslidzhennia mate-matychnoi modeli za dzherelamy eksperymentalnykh danykh metodamy rehresiinoho analizu. Rivne: MEHU, 140.
- [6] Dreshpak, O.S, Dreshpak, N.S., & Vypanasenko, S.I. (2022). Technology of Raw Materials Enrichment of Inhomogeneous Carbonate Deposits and Evaluation of its Energy Efficiency: Multi-authored: Monograph. Romania: UNIVERSI-TAS Publishing. Retrieved from <https://doi.org/10.31713/m1107>.
- [7] «Pro energozberezhennya» [Elektronnyi resurs]: Zakon Ukrainy [Priinyaty postanovo Verkhovnoyi Radi Ukrainy № 75/94-BP від 01.07.94.– Rezhim dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>
- [8] Nacionalne agentstvo Ukrainy z pitan efektyvnogo vikoristannya energetichnih resursiv (2009) Metodika viznachennya neracionalnogo (neefektyvnogo) vikoristannya palivnoenergetichnih resursi. Kiyiv: GO.
- [9] V Ukraini pryiniato natsionalni standarty z enerhoaudytu ta enerhetychnoho menedzhmentu vidpo-vidno do yevropeiskykh norm [Elektronnyi resurs]: sait Derzhenerhoefektyvnosti, 2016. – Rezhym dostupu: <http://sae.gov.ua/uk/news/1184> (data zvernennia: 26.09.2023).
- [10] Vprovadzhennia standartu system enerhomenedzhmentu v promyslovosti Ukrainy [Elektronnyi resurs]: sait proiektu UNIDO/GEF, 2015. – Rezhym dostupu: <http://www.ukrice.org.ua/uk/proekt/meta-proekta> (data zvernennia: 26.09.2023).
- [11] Shullie, Yu. A., Rozianskyi, I.S. (2016). Vykorystannia ASKOE dlia pidvyshchennia efektyvnosti enerhovykorystannia na promyslovykh pidpriemstvakh. Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia, 1, 59-63.
- [12] Kodeks komertsiiinoho obliku elektrychnoi enerhii. No311§. section I p. 1.2. (2018). – Rezhim dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text>.
- [13] Pothina, R., & Kecojevic, V. (2007). A Gyrotory Crusher Model and Impact Parameters Related to Energy Consumption. Minerals and Metallurgical Processing, 24(3), 170-180.
- [14] Aslaksen, E. (2008) Designing complex systems. Foundations of design in the functional domain. Auerbach publications, 176.
- [15] Barrera, D., Diaz, M. (2011) Communicating systems with UML 2. Modeling and analysis of network protocols. ISTE ltd, 268.
- [16] Boehm, B. (2010) A spiral model of software development and enhancement. Object management group, 180.
- [17] Palekhova, L., Simon, S. (2016). Competitive advantages through the implementation of international energy management standards. Bulletin of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture, 3, 42-51. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Competitiveadvantages-through-the-implementation-PaliekhovaSimon/9c1feb3e964bc8b5c3b9fbabdbdb81d4484fb>