



Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№2'2022

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

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2022

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.

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ
КОЛЕГІЇ

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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.

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

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

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

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

Видавець: Національний університет "Запорізька політехніка", м. Запоріжжя. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №6952 від 22.10.2019р.
Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №24219-14059 ПР від 07.11.2019р.
Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ. національний університет "Запорізька політехніка", вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон:+380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rfvv@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 07.06.2022 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №6 від 24.03.2022 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,74. Тираж 300 прим. Зам. №383.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№2'2022

Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2022

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

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

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

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

Founder and editor: Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia. Certificate of publisher Civil Code №6952 dated October 22, 2019.
Journal was registered: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 24219-14059 PR dated November 7, 2019.
Address of editor and editorial office: Zaporizhzhia Polytechnic National University, st. Zhukovsky, 64, Zaporozhia, 69063, Ukraine. Phone: +380(61)769-82-96 Fax: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.
E-address: http://ee.zntu.edu.ua; **E-mail:** etae@ukr.net

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on June 07, 2022 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.6 dated may 24, 2022). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,74. Number of copies printed 300. Rep. №383.

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Родькін Д.Й., Хребтова О.А., Зачена Н.В., Зачена Ю.В.

Рушання й стопоріння як енергокінематичні режими електроприводів промислових механізмів8

Коцур М.І., Безверхня Ю.С., Яримбаи Д.С., Коцур І.М.

Особливості роботи механізму переміщення мостового крану при живленні від тролейного шинопровода в умовах дії вищих гармонік струму.....18

Брилистий В.В.

Дослідження енергетичних характеристик електромеханічної системи керування 4 - приводним електричним транспортним засобом.....30

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Зайцев Р.В., Кіріченко М.В., Мінакова К.О., Томашевський Р.С., Нікітін В.О., Харченко М.М.

Розрахунок схеми електронного навантаження для тестування низьковольтних джерел....38

Шевченко С.Ю., Данильченко Д.О., Вязовиченко Ю.А., Потривай А.Е., Цюпа В.М.

Моделювання електричного поля прохідного полімерного ізолятора для визначення точок концентрації поля49

III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Дубровін В.І., Дейнега Л.Ю., Лактіонов В.В.

Енергозбереження на енергоємних підприємствах58

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

Rodkin D.I., Khrebtova O.A., Zachepa N.V., Zachepa Iu.V.

Starting and stopping as energokinematic regimes of electric drives of industrial mechanisms.....8

Kotsur M.I., Bezverkhnia Yu.S., Yarymbash D.S., Kotsur I.M.

Peculiarities of overhead crane movement mechanism operation when powered by a
basbar's trolley at action of higher current harmonics.....18

Brylysty V.V.

Investigation of energy characteristics of the electromechanical control system of 4-drive
electric vehicle.....30

II POWER ENGINEERING

***Zaitsev R.V., Kirichenko M.V., Minakova K.O., Tomashevskii R.S., Nikitin V.O.,
Kharchenko M.M.***

Calculation of the electronic loading scheme for testing low voltage sources38

Shevchenko S.Y., Danylchenko D.A., Vyazovichenko Y.A., Potryvai.A.E., Cyupa V.N.

Simulation of the electric field of a polymeric insulator bushing to determine the field
concentration points.....49

III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Dubrovin V.I., Deineha L.Y., Laktionov V.V.

Energy saving at energy-intensive enterprises58

СОДЕРЖАНИЕ

I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Родькин Д.И., Хребтова О.А., Зачена Н.В., Зачена Ю.В.

Трогание и стопорение как энергокинематические режимы электроприводов промышленных механизмов.....8

Коцур М.И., Безверхняя Ю.С., Ярымбаши Д.С., Коцур И.М.

Особенности работы механизма перемещения мостового крана при питании от троллейного шинпровода в условиях действия высших гармоник тока.....18

Брылистый В.В.

Исследование энергетических характеристик электромеханической системы управления 4-х приводного электрического транспортного средства.....30

II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Зайцев Р.В., Кириченко М.В., Минакова К.А., Томашевский Р.С., Никитин В.А., Харченко Н.М.

Расчет схемы электронной нагрузки для тестирования низковольтных источников.....38

Шевченко С.Ю., Данильченко Д.А., Вязовиченко Ю.А., Потривай А.Э., Цюпа В.Н.

Моделирование электрического поля проходного полимерного изолятора для определения точек концентрации поля.....49

III АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Дубровин В.И., Дейнега Л.Ю., Лактионов В.В.

Энергосбережение на энергоемких предприятиях58

УДК 81`38

РУШАННЯ Й СТОПОРІННЯ ЯК ЕНЕРГОКІНЕМАТИЧНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРОМИСЛОВИХ МЕХАНІЗМІВ

- РОДЬКІН Д.Й.** д-р техн. наук, професор кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна;
- ХРЕБТОВА О.А.** канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: 34092@ukr.net;
- ЗАЧЕПА Н.В.** канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net
- ЗАЧЕПА Ю.В.** канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: zip1981@ukr.net

Мета роботи. Провести аналіз чинних технічних термінів, що відповідають фізичним процесам в системі електропривода за час нетипових динамічних режимів. Виконати огляд можливих режимів в кінематичних ланках електропривода під час динамічних режимів, що можуть впливати на характер протікання перехідних процесів. Сформулювати визначення технічних термінів, що характеризують реальні енергокінематичні режими під час рушання та пуску електропривода промислових механізмів, які раніше не розглядалися як несуттєві або як не існуючі.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач проведено аналіз технічних термінів, що визначені, технічною літературою, ГОСТами, ДСТУ тощо. Для формулювання нової термінології для фізичних процесів нетипових режимів виконано аналіз фізико-енергетичних процесів, що протікають в електричних та кінематичних ланках електропривода за таких динамічних режимів.

Отримані результати. Визначені можливі випадки виникнення нетипових режимів роботи кінематичних кіл та енергетичних каналів перетворення енергії за час пуску електроприводів технологічних механізмів під навантаженням, для характеристики яких відсутня технічна термінологія. За результатами аналізу енергокінематичних режимів запропонована технічна термінологія, що в повною міру висвітлює та характеризує розглянуті нетипові процеси, що мають місце під час виконання рушання та пуску технологічних механізмів.

Наукова новизна. Вперше запропонована технічна термінологія, що характеризує енергокінематичні режими електроприводів технологічних механізмів під час пуску.

Практична цінність. Вперше пропонується застосування технічних термінів для чіткого і наочного представлення енергокінематичних режимів, що відбуваються під час рушання та пуску під навантаженням різних видів технологічних механізмів.

Ключові слова: технічні терміни; енергокінематичні режими; рушання; стопоріння.

I. ВСТУП

Робота електротехнічних пристроїв виконується за загальними принципами і складається з основних складових цього процесу. Для вірного уявлення, процесів, що відбуваються в електричних машинах та електроприводі застосовується терміни, які здебільшого визначені ГОСТами та ДСТУ.

Технічна термінологія – це термінологія галузі техніки, яка пов'язана з окремими галузями виробництва та промисловості [1]. Термінологія (від лат. Terminus – «кінець, межа» та гр. Λογία – «наука, вчення») сукупність термінів галузей науки, техніки, мистецтва або всіх термінів будь-якої мови [2]. Термін – слово чи словосполучення, що означає спеціа-

льне поняття у науці, техніці, мистецтві [3].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Технічні терміни встановлювалися на початкових етапах розвитку електропривода, тому терміни для деяких процесів, що відбуваються під час спеціальних режимах роботи електропривода, були не визначені, тому що розглядалися як несуттєві або як не можливі.

З урахуванням інтенсивного розвитку мікропроцесорної техніки і методик автоматичного керування, які дозволяють реалізувати різні режими роботи електропривода в автоматизованому режимі з одного боку і зростання вимог до якісного виконання технологічних операцій, виникає питання про представлення

термінів які чітко відображають ті фізичні процеси, які відбуваються в електроприводі під час виконання технологічного циклу.

Застосування нових розробок під час автоматизації систем електропривода технологічних механізмів та розробка оригінальних алгоритмів керування цих систем дозволяє формувати індивідуальні режими роботи електроприводів технологічних механізмів які не мають чіткого представлення у вигляді технічної документації [4]-[10]. Сучасна лінгвістична наука направлена на інтеграцію української технічної термінології до європейського зразку та випускає із виду формування нових технічних термінів в сучасній вітчизняній науці.

III. МЕТА РОБОТИ

Використовуючи існуючі ГОСТи, ДСТУ, технічну літературу та технічні словники проведено аналіз існуючих технічних термінів які відповідають фізичним процесам що проходять в системі електропривода під час не типових динамічних режимах. На базі сучасних розробок щодо систем керування електроприводом і розробки оригінальних алгоритмів керування технологічними процесами виконати огляд можливих режимів в кінематичних ланцюгах електропривода під час динамічних режимів, що можуть впливати на характер протікання перехідних процесів. На базі отриманих досліджень сформувані визначення технічних термінів які позначають реальні енергокінематичні режими під час рушання та пуску електропривода промислових механізмів, які раніше не розглядалися як не суттєві або як не існуючі.

Таким чином мета роботи є обґрунтування технічних термінів для представлення реальних процесів під час енергокінематичних режимів. Обґрунтування та пояснення нового технічного терміну - енергокінематичні режими.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Основний етапи роботи будь-якого електроприводу - це пуск, робота, процес гальмування та зупинка, як закінчення виконання технологічної операції. Ці етапи можуть складатися з кількох складових, які визначають той чи інший фізичний процес, позначений відповідним технічним терміном під час проходження електроприводом цих етапів. (рис.1)

Розглянемо детально ці процеси та їх технічні терміни.

За тлумачним словником Ушакова, запуск - приведення чогось до руху, в дію [11]. Пуск [2] це момент приведення до руху. Пуск електропривода по ГОСТу [12] визначається як процес приведення машини зі стану спокою та зняття напруги у стан обертання.

Наведені джерела акцентують увагу, що цей процес включає увімкнення напруги, рушання, прискорення і, якщо потрібно, синхронізацію з живленням.

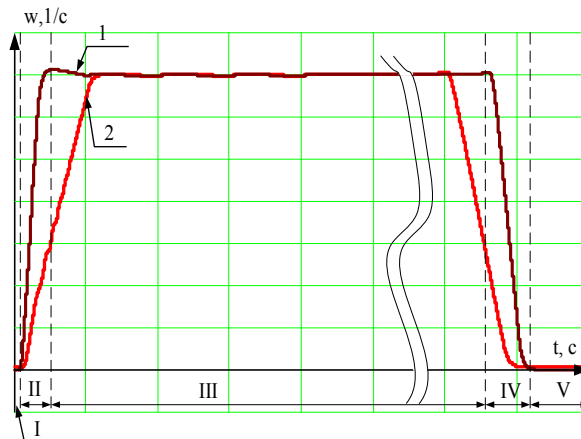


Рисунок 1. Типова циклограма електроприводу технологічного механізму при пуску під навантаженням при некерованій роботі(1), при керованій роботі(2): I – рушання; II – запуск; III – робота; IV – гальмування; V – зупинка.

Як видно процес пуску складається з наступних складових: рушання, прискорення і точки виходу на ustalений режим роботи.

Процес пуску в сучасних дослідженнях розглядається за різних умов навантаження. Якщо це пуск електропривода без навантаження або на холостий хід механізмів без складного кінематичного ланцюга, то процес пуску представлений етапами: пуск, розгін і точкою виходу на робочий режим (рис 2).

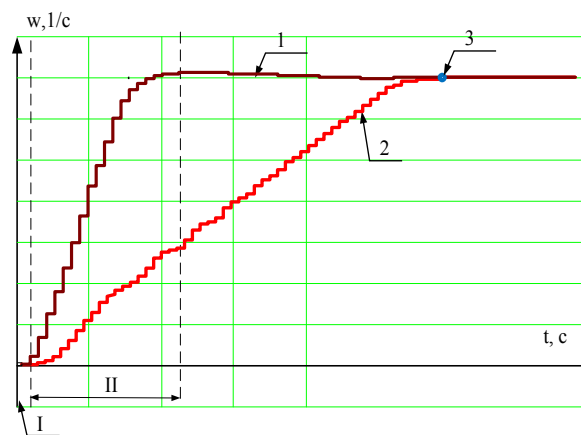


Рисунок 2. Графік етапу пуску (I), розгону (II) та точка виходу на робочий режим

Якщо пуск електропривода виконується у важких умовах (під навантаженням) або зі складним кінематичним ланцюгом етапи пуску починається з процесу рушання, а потім безпосередньо пуск, розгін і робота (рис. 3).

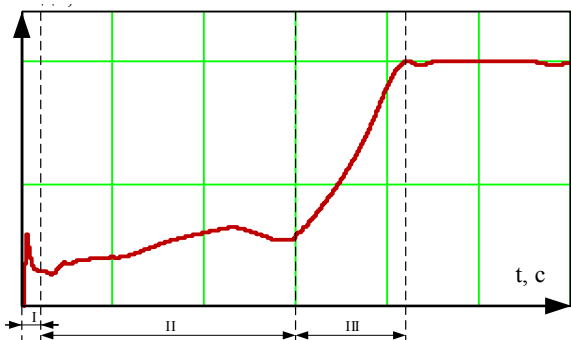


Рисунок 3. Графік етапу рушання, пуску та розгону: I – перехід електромеханічної системи зі стану спокою до стану руху; II – рушання (руйнування сил взаємотяжіння); III – розгін

Рушання може характеризуватись рухом магнітного поля в електричній машині або зміною внутрішньої пружності кінематичного тіла. Таким чином описується процес переходу фізичного тіла зі стану спокою до стану руху (рис. 3, I). Рушання по [13] – рухатися з місця, здійснювати рух. Рушання електродвигуна – стан машини в момент виходу зі стану спокою до стану обертання [12]. У [14] поняття рушання визначається як момент початку руху фізичного об'єкта, опір руху у якого значно більше, ніж при встановленому русі.

У [11] поняття рушання як такого не розглядається там представлено дієслово рушати – зрушуватися з місця, прямувати кудись.

Спираючись на закони фізики можна стверджувати, що рушання є процес який відбувається під впливом зовнішньої сили, прикладеної до маси або до точки з'єднання кінематичної пари у початковій нульовій позначки і перевищує сили опору, що призводить до руху маси або руху в кінематичній парі.

Так само можна стверджувати, що рушання є результатом дії імпульсу сили, тобто під дією великої сили протягом короткого періоду (фактично це виходить "удар") енергія імпульсу руйнує існуючі сили взаємотяжіння контактуючих поверхонь у кінематичних парах або перетворюється на кінетичну енергію, яка в свою чергу призводить масу до початку руху у напрямку прикладеного імпульсу.

Таким чином можна припустити, що рушання це процес переходу тіла зі стану спокою в стан руху під впливом зовнішніх сил, що перевищують внутрішні та зовнішні сили взаємодії складових об'єкта.

Грунтуючись на цих положеннях видно, що рушання відбувається в короткий період часу і є процесом зміни енергії в кінематичних з'єднаннях технологічних механізмів таким чином до цього явища можна застосувати термін – енергокінематичний режим.

При динамічних режимах після рушання, як правило, слідує етап розгону. За визначенням [11] розгін представляється, як рух з швидкістю, що поступово збільшується. За наведеним у [13] понятті розгін цей рух із поступово зростаючою швидкістю. Збільшення

швидкості може відбуватися за лінійним законом (рис. 4,2) або за експонентним (рис. 4,1), однак обидва процеси будуть відноситися до розгону. Варто зазначити, що при спеціальних режимах електропривода розгін може відбуватися за змінним законом, який визначається від моменту опору і представлений як функція від моменту опору $a = F(Mc)$ (рис. 4,3).

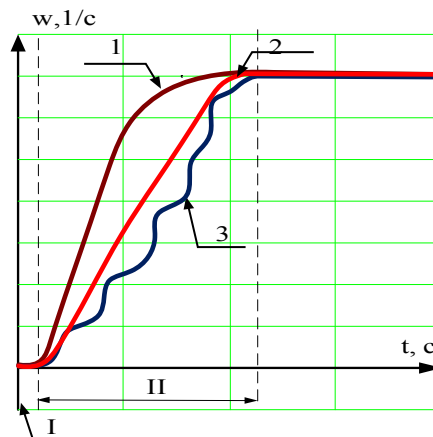


Рисунок 4. Графік процесу розгону: 1 – експоненціальна залежність; 2 – лінійна залежність; 3 – залежність від $a = F(Mc)$.

Процес розгону в електроприводі – це необхідність створення рушійного моменту електродвигуном, який буде приводити в рух кінематичний ланцюг робочого обладнання, робочий орган і робоче середовище або об'єкт. Момент електропривода повинен бути достатнім, щоб подолати зусилля внутрішнього опору системи електропривода і забезпечити кінематичною енергією сам робочий об'єкт, який приводиться до руху і повинен рухатися із заданою робочою швидкістю.

Безпосередній перехід при русі робочого об'єкта від нульової швидкості до встановленої, за певний час, що формується з урахуванням масогабаритів робочого об'єкта та моментів сформованими електродвигуном у технічній літературі визначається як розгін [15]–[17].

Якщо розглядати фізичні процеси, що відбуваються в реальних технологічних механізмах, то процес рушання і розгону може супроводжуватися різким припиненням руху, саме робочого об'єкта, тобто електропривод створює момент руху, робочий орган надає кінематичну енергію в робочий об'єкт, але сам об'єкт не рухається. Таке явище по [1], [18] визначається як стопоріння.

У довідниках стопоріння визначається як технологічний процес, що забезпечує нерухоме з'єднання частин машини, часто за допомогою спеціальної деталі-стопора.

Однак стопоріння може бути причиною не тільки спеціального механічного пристрою, але реакцією на фізичні процеси, які можуть виникати: при аварійних режимах роботи електропривода, поломка кінематич-

них з'єднань у процесі перевантаження та втоми металу, при простою обладнанні із залишками робочої сировини або зміни фізико-хімічних властивостей самого технологічне обладнання (загусання мастила, ржавіння з'єднань, адгезія дотичних поверхонь, потрапляння сторонніх речовин тощо). Знову ж таки під час стопоріння в кінематичних з'єднаннях технологічного механізму відбуватиметься перетворення кінетичної енергії, за короткий період часу, в потенційну внаслідок удару, так і в теплову, знову ж таки, в наслідок удару, таким чином формується енергокінематичний режим.

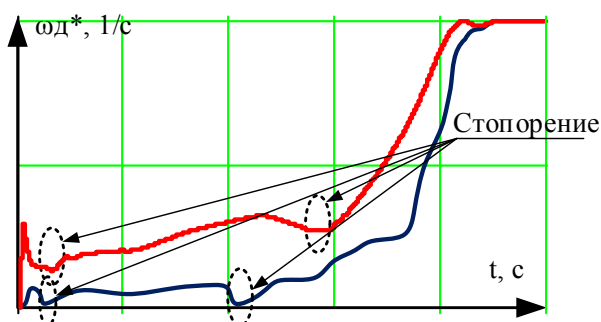


Рисунок 5. Моменти стопоріння на графіку пуску електропривода

Тому можна припустити, що визначення [1], [18] не відповідає дійсності і вимагає доповнення. Таким чином щоб повністю уявити процес стопоріння, визначення необхідно доповнити наступним виразом: або є наслідком стрибкоподібного збільшення моменту опору працюючого об'єкта, який значно перевищує рушійну силу електропривода.

Стопоріння технологічного механізму у процесі розгону чи роботи супроводжується динамічними навантаженнями.

Динамічне навантаження, це навантаження яке характеризується швидкою зміною у часі його значення, напрямом швидкості, тобто наявності прискорень до точки докладання що викликає в елементах конструкції значні сили інерції [1].

До динамічних навантажень відносять ударні навантаження. Під ударом розуміється взаємодія двох рухомих мас (провідної та веденої), пов'язане з різкою зміною швидкості однієї з маси за дуже малий проміжок часу.

Час удару вимірюється в тисячних, котрий іноді мільйонних частках секунди, а сила удару сягає великої величини, за рахунок зменшення швидкості робочої маси майже до нуля, протягом малого проміжку часу. Цей процес формує момент напруги та деформацію у системі технологічного механізму, яка досягає найбільших значень [19].

З технічної літератури [19]–[21] відомо, що під час удару дотримується закон збереження енергії, тобто. кінетична енергія, якою володіє маса, що руха-

ється, в момент удару переходить в потенційну енергію пружно деформованого тіла:

$$T = U\delta + T1, \quad (1)$$

де T – кінетична енергія маси що ударяє (системи), яку вона має в момент удару; $U\delta$ – потенційна енергія пружно деформованої ударної маси (системи); $T1$ – кінетична енергія руху ударної маси (системи) [19].

Одним з різновидів ударного моменту є удар, що скручує, який має місце при різкому зниженні кутової швидкості валу з маховиком, при раптовій його зупинці [20], [21]. Такі удари можуть виникати при руйнуванні технологічного механізму, і при розгоні.

Процес розгону робочого механізму закінчується точкою переходу до стаціонарного режиму. Встановлений режим – стан системи під час встановленого (стаціонарного) режиму описують її поведінку, як не зміною за часом (рис. 6,1) чи зміною за періодичністю від часу (з постійним періодом, амплітудою і фазою) (рис. 6,2) [20]–[22].

У [18] режим роботи трактується як режим роботи, при якому нормальні характеристики об'єкта не виходять за межі допустимих відхилень протягом дозвольного періоду часу.

Очевидно, що в досить складній системі електропривода режиму, що повністю встановився, не існує, так як зі збільшенням числа елементів, об'єднаних в систему, ймовірність того, що хоча б один з них змінить свій робочий стан або свій режим роботи досить велика [23]. Внаслідок цього можна вважати, що в єдиній системі постійно відбувається один або кілька перехідних процесів і енергосистема постійно перебуває в перехідному режимі. З іншого боку, для дослідження більшості процесів у великій енергосистемі можна розглядати режими, що квазі встановлений, тобто такі режими, коли параметри змінюються незначно за періодичним законом і цими змінами можна знехтувати.

Такі режими роботи відображені в [18], а саме режим роботи системи, що встановився, має місце при постійному навантаженні або при випадкових навантаженнях, амплітудне значення струму яких в імпульсі не більше 7 % номінального амплітудного значення струму каналу (джерела), під час зміни частоти обертання генераторів не більше ніж на 1% в 1 сек. або коливання цієї частоти не більше ніж на 0,2% номінального значення з періодом більше 0,33 сек.

У режим роботи можуть бути включені перехідні процеси з меншими відхиленнями характеристик, ніж відхилення, встановлені для нормальної роботи [18].

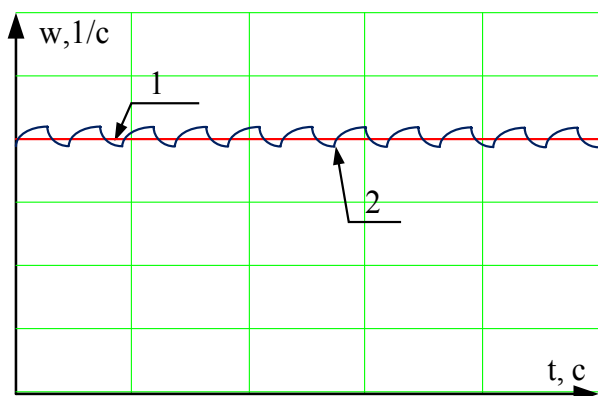


Рисунок 6. Графік швидкості при режимі роботи: 1 – робочий режим; 2 – квазівстановлений режим

Закінчення технологічної операції супроводжується процесом *гальмування*. *Гальмування в механіці* – уповільнення, зупинка руху об'єкта за допомогою гальма [13]. За джерелом [1] гальмування – уповільнення руху чогось чи зупинка чогось (зазвичай з допомогою гальма).

При розгляді режимів гальмування електроприводу їх можна розділити на види. *Перший вид* гальмування найпростіший у виконанні, це відключення електропривода від джерела живлення і гальмування виконується під впливом зовнішніх сил. *Другий вид* гальмування – коли виконується за допомогою зміни електромагнітних параметрів самого електропривода, тобто механізм переходить у стан спокою під впливом внутрішніх сил електричної машини. *Третій вид* гальмування – це гальмування за допомогою механічних пристроїв, встановлених на технологічному обладнанні [15]–[17], [21]–[23]

Гальмування в системі електропривода виконується за рахунок зміни напрямку рушійного моменту або за відсутності рушійного моменту за рахунок реактивного моменту, що формує технологічний механізм [21]–[23].

Отже, можна припустити, що визначення терміну гальмування електропривода як таке невизначене. Тому авторами запропоновано вести до визначення гальмування, наступні пояснення. Якщо розглядати фізичний процес, то *гальмування електропривода є перехід системи електропривода зі стану режиму, що встановився, в стан повного не руху або спокою під впливом або зовнішніх механічних сил, або внутрішніх сил опорів, або зміни параметрів електричного і електромагнітного поля електричної машини.*

Режим гальмування закінчується повною зупинкою технологічного об'єкта.

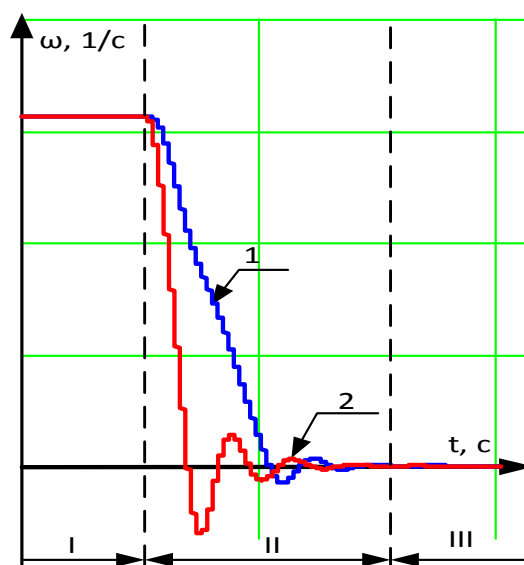


Рисунок 7. Графік гальмування електропривода: 1 – під навантаженням; 2 – без навантаження, де I – робочий режим, II – режим гальмування, III – зупинка

Останов – вид механічного гальмівного пристрою, призначений виключно для утримання вантажу при його прагненні до руху [7]. В інших джерелах [4], [6] термін *Зупинка* - припинення руху будь-кого або будь-що або перерва у будь-якій дії, роботі. У джерелі [11] наведено більш повне визначення – зупинка без припинення живлення привода, при якому не виконується подальший рух об'єкта.

Якщо розглядати процес зупинки електромеханічної системи технологічного механізму, то найвірніше говорити про режим переходу зі стану руху в нерухомому стані технологічного об'єкта з запасом енергетичних сил, що залишилися, і розсіювання їх протягом часу, тобто зміні електромагнітних і енергокінематичних властивостей електромеханічної системи технологічного механізму.

Для наочного уявлення всі варіанти визначення розглянутих термінів зведено табл. 1.

У представленому матеріалі була виконана спроба систематизувати фізичні явища, які описують процеси при роботі електропривода технологічних механізмів і встановити відповідне визначення для термінів, що позначають їх і відображають реальні процеси що відбуваються під час не типових динамічних режимів системи електропривода.

Пропонується застосувати визначення до технічних термінів, наведених у табл. 1, які розглядалися вище.

Таблиця 1. Визначення для термінів за наданими джерелами

Терміни	Тлумачний словник Ушакова	Тлумачний словник Ожегова	ГОСТ ІЕС 60050-411-2015	Вікісловник	Словник-довідник термінів нормативно-технічної документації.	Визначення для термінів
Пуск	Дія дієслова. пустити	Момент приведення в рух	Процес приведення машини зі стану спокою та зняття напруги у стан обертання.	Те саме, що запуск; приведення чогось у рух	Перехід машини або однієї з її частин стану спокою в стан руху.	
Рушання	Дія дієслова.	–	Стан машини в момент виходу зі стану спокою у стан обертання.	–	–	Процес переходу фізичного об'єкта зі стану спокою до стану руху під впливом зовнішніх сил, що перевищують внутрішні та зовнішні сили взаємодії складових об'єкта
Розгін (прискорення)	Дія дієслова. розігнати-ся, розганяти-ся	Теж що й розігнати. когось. Довести рух на великій швидкості.	Процес збільшення частоти обертання машини після рушання	Дія за значенням гол. розганяти, розганяти-ся; рух з швидкістю, що поступово збільшується	Явище або величина, що змінюється між двома станами, що встановилися, за інтервал часу	Перехід руху робочого об'єкта від нульової швидкості до встановленої, за певний час, що формується з урахуванням масогабаритів робочого об'єкта та моментів сформованими електродвигуном
Стопоріння	–	–	–	затримувати рух чогось	Різде припинення руху за рахунок жорсткої кінематичної фіксації з'єднань, що рухаються	Технологічний процес, що забезпечує нерухоме з'єднання частин машини, часто за допомогою спеціальної деталі-стопора або є наслідком стрибкоподібного збільшення моменту опору об'єкта, що працює, що значно перевищує рушійну силу електропривода.
Встановлений режим	–	–	–	–	Режим роботи, за якого нормальні характеристики електроенергії не виходять за межі допустимих відхилень протягом довільного періоду часу.	Стан системи можна вважати таким, що встановився (стаціонарним), якщо параметри, що описують її поведінку, не змінюються у часі або змінюються за періодичним законом від часу (з постійним періодом, амплітудою та фазою) у допустимому діапазоні, який не викликає зміни режиму роботи
Гальмування	Дія дієслова. гальмувати. Автоматичне гальмування.	–	–	–	Процес створення та зміни штучного опору руху	Перехід системи електропривода або фізичного об'єкта зі стану режиму, що встановився, в стан повного не руху або спокою під впливом або зовнішніх механічних сил, або внутрішніх сил опорів, або зміни параметрів електричного та електромагнітного поля електричної машини.

Зупинка	Дія дієсло- ва. зупиня- ти, когось. Припинити рух когось, чогось, утримати на місці.	–	–	Примушу- вати когось чи щось припинити рух; при- пинення руху	Зупинка без припинення жи- влення приводу, при якому не виробляються подальші рухи.	Перехід зі стану руху до нерухомо- го стану технологічного об'єкта з запасом енергетичних сил, що за- лишилися, і розсіюванні їх протягом часу, тобто зміні електромагнітних і енергокінематичних властивостей електромеханічної системи техно- логічного механізму
---------	---	---	---	---	--	--

V. ВИСНОВКИ

У роботі виконана спроба визначення і обґрунтування ведення нових технічних термінів які визначають реальні процеси в електроприводі під час нестандартних режимів рушання та пуску під навантаженням технологічних механізмів. Аналіз фізичних процесів в кінематичних ланцюгах електропривода які протікають під час переходу технологічного механізму із стану спокою в стан руху під навантаженням, за наведеними в основному тексті посиланнями, показав що дані явища значно впливають на формування енергетичних показників електропривода. Тому обґрунтовано можна стверджувати що ці явища взаємопов'язані і повинні мати відповідний оригінальний термін. Тому було запропоновано вести новий технічний термін - енергокінематичні режими.

Авторами зазначено що запропонований термін складається з наступних складових - технічний термін рушання та стопоріння, так як ці явища є наочним прикладом впливу зусиль що формуються в кінематичних з'єднань на формування енергетичних показників електропривода технологічних обладнання.

Тому пропонується застосування наведених технічних термінів для чіткого представлення енергокінематичних режимів що відбуваються під час рушання та пуску під навантаженням різних видів технологічних механізмів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Contributors to Wikimedia projects. Википедия – свободная энциклопедия. Википедия – свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата звернення: 15.04.2022).
- [2] Толковый словарь Ожего ва URL:<https://slovarozhegova.ru/about.php> (дата звернення: 17.04.2022).
- [3] Великий тлумачний словник сучасної української мови / Уклад. і головн. ред. В. Т. Бусел. К: Ірпінв: ВТФ «Перун», 2001. 1440 с.
- [4] Хребтова О. А., Зачепа Н. В. Аналіз систем електропривода для виконання рушання та пуску під навантаженням. Електротехніка та електроенергетика. Запоріжжя: ЗНТУ, 2020. Вип. 3/2020. С. 45-52.
- [5] Хребтова О.А., Ченчевой В.В., Огарь В.А. Определение момента асинхронного двигателя при трогании. Электромеханичні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2013. Вип. 4/2013 (24). 106 с.
- [6] Огарь В. О. Родькин Д. Й. Характеристики асинхронных двигунів з урахуванням нелінійних властивостей магнітної системи : монографія. – Кременчук : ПП Щербатих О. В. 2013. – 320 с.
- [7] Хребтова О. А., Зачепа Н. В. Теплові режими автоматизованої системи електропривода під час рушання під навантаженням. Електротехніка та електроенергетика. Запоріжжя: ЗНТУ, 2020. Вип. 4/2020. С. 82-91.
- [8] Родькин Д. И., Ченчевой В. В., Огарь В. А. Природа аномальных потерь в стали в режиме глубокого насыщения. Электромеханичні і енергозберігаючі системи. – 2014. № 1. – 76-93 с.
- [9] Khrebtova O., Zachepa I., Rodkin I., Zachepa N., Khrebtova A. and Kuznetsov V.: Analysis of Vibroreological Indicators in the Formation of the Moment of Control of the Electric Drive in Special Modes. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (2021).
- [10] Zachepa I., Zachepa N., Khrebtova O., Serhienko I., Shokarov D. and Mykhalchenko G.: Guar-anteed and Reliable Excitation of Asynchronous Generator Coupled to Shaft of Vehicle. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (2021).
- [11] Толковый словарь Ушакова. Gufo.me. URL: <https://gufo.me/dict/ushakov> (дата звернення: 18.04.2022).
- [12] ГОСТ ИЕС 60050-411-2015 Международный электротехнический словарь. Часть 411. Машины вращающиеся. Разделы 411-52 – Работа.
- [13] Викисловарь. Викисловарь. URL: <https://ru.wiktionary.org> (дата звернення: 15.04.2022).
- [14] Технический железнодорожный словарь. под редакцией инж. Н. Н. Васильева, проф. О. Н. Исаакяна, Н. О. Рогинского, Я. Б. Смолянского, В. А. Соковича Т. С. Хачатурова. М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство. 1941.
- [15] Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 772 с.
- [16] Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982.
- [17] Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Тео-

- рия автоматизированного электропривода. Москва: Энергия, 1979. – 616 с.
- [18] Словарь-справочник терминов нормативно-технической документации. Источник: <http://find-info.ru/doc/dictionary/normative-technical-documentation/articles/10744/pusk.htm> (дата звернення: 19.04.2022).
- [19] Динамические нагрузки. Удар https://inmt.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_15053/zaочно/sopromat/Tema_6_i_zadacha_13_Dinamicheskie_nagruzki_Udar.pdf (дата звернення: 18.04.2022).
- [20] Гельфер Я. М., Законы сохранения. Москва: «Наука». 1967. 264 с.
- [21] Франкфурт У.И., Закон сохранения и превращения энергии. Москва: «Наука». 1978. 191 с
- [22] Филиппов Б.А., Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. Москва: МЭИ, 1977.
- [23] Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1992.

Стаття надійшла до редакції 05.05.2022

ТРОГАНИЕ И СТОПОРЕНИЕ КАК ЭНЕРГОКИНЕМАТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

- РОДЬКИН Д.Й.** д-р техн. наук, профессор кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина;
- ХРЕБТОВА О.А.** канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: 34092@ukr.net;
- ЗАЧЕПА Н.В.** канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net
- ЗАЧЕПА Ю.В.** канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: zip1981@ukr.net

Цель работы. Провести анализ действующих технических терминов, отвечающих физическим процессам в системе электропривода за время нетипичных динамических режимов. Выполнить обзор возможных режимов в кинематических звеньях электропривода при динамических режимах, которые могут влиять на характер протекания переходных процессов. Сформировать определение технических терминов, характеризующих реальные энергокинематические режимы при трогании и пуске электропривода промышленных механизмов, которые ранее не рассматривались как существенные или как существующие.

Методы исследования. Для решения поставленных задач проведен анализ определенных технических терминов, технической литературой, ГОСТами, ДСТУ и т.д. Для формулирования новой терминологии для физических процессов нетипичных режимов выполнен анализ физико-энергетических процессов, протекающих в электрических и кинематических звеньях электропривода при динамических режимах.

Получены результаты. Определены возможные случаи возникновения нетипичных режимов работы кинематических кругов и энергетических каналов преобразования энергии при пуске электроприводов технологических механизмов под нагрузкой, для которых отсутствует техническая терминология. По результатам анализа энергокинематических режимов предложена техническая терминология, которая в полной мере описывает и характеризует рассмотренные нетипичные процессы, которые имеют место при выполнении трогания и пуска технологических механизмов.

Научная новизна. Впервые предложена техническая терминология, характеризующая энергокинематические режимы электроприводов технологических механизмов при запуске.

Практическая ценность. Впервые предлагается применение технических терминов для четкого и наглядного представления энергокинематических режимов, происходящих при трогании и пуске под нагрузкой различных видов технологических механизмов.

Ключевые слова: технические термины; энергокинематические режимы; трогания; стопорение.

STARTING AND STOPPING AS ENERGOKINEMATIC REGIMES OF ELECTRIC DRIVES OF INDUSTRIAL MECHANISMS

- RODKIN D.I.** Doctor of Engineering, professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, Kremenchuk,

- Ukraine;
- KHREBTOVA O.A.** Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: 34092@ukr.net;
- ZACHEPA N.V.** Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net
- ZACHEPA I.U.V.** Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: zip1981@ukr.net

Purpose. To analyze the current technical terms that correspond to the physical processes in the electric drive system during atypical dynamic modes. Review possible modes in the kinematic parts of the electric drive during dynamic modes that may affect the nature of the transients. To form a definition of technical terms that characterize the real energy-kinematic regimes when moving and starting the electric drive of industrial mechanisms, which were not previously considered as insignificant or as non-existent.

Methodology. In order to solve the set tasks, the analysis of the technical terms defined by the technical literature, GOST, DSTU, etc. was carried out. To formulate new terminology for physical processes of atypical modes, the analysis of physical and energy processes occurring in the electrical and kinematic parts of the electric drive under such dynamic modes is performed..

Findings. Possible cases of atypical modes of operation of kinematic circuits and energy channels of energy conversion during the start-up of electric drives of technological mechanisms under load, for the characteristics of which there is no technical terminology, are identified. Based on the results of the analysis of energy-kinematic regimes, technical terminology is proposed, which fully covers and characterizes the considered atypical processes that take place during the moving and start-up of technological mechanisms.

Originality. For the first time, technical terminology has been proposed that characterizes the energy-kinematic modes of electric drives of technological mechanisms during start-up.

Practical value. For the first time, the use of technical terms is proposed for a clear and visual representation of energy kinematic modes that occur during the moving and start-up under load of different types of technological mechanisms.

Keywords: technical terms; energy kinematic modes; movement; locking.

REFERENCES

- [1] Contributors to Wikimedia projects. Wikipedia is a free encyclopedia. Wikipedia is a free encyclopedia. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (access date: 15.04.2022).
- [2] Ozhegov's Explanatory Dictionary URL: <https://slovarozhegova.ru/about.php> (access date: 17.04.2022).
- [3] Large explanatory dictionary of the modern Ukrainian language / Uklad. and main. ed. W. T. Busel. K: Irpin: VTF "Perun", 2001. 1440 p.
- [4] Khrebtova O.A., Zachepa N.V., (2020). Analysis of electric drive systems for starting and starting under load. *Electrical engineering and electric power*. Zaporozhye: ZNTU, Issue. 3/2020, 45-52.
- [5] Khrebtova O.A., Chencheva V.V., Ogar V.A. (2013). Determining the torque of an induction motor when starting. *Electromechanical and energy saving systems: quarterly research and production journal*. Kremenchuk: KrNU, Vip. 4/2013 (24). 106.
- [6] Ogar V.O., Rodkin D.I. (2013). Characteristics of induction motors taking into account the nonlinear properties of the magnetic system: a monograph. 320.
- [7] Khrebtova O.A., Zachepa N.V. (2020). Thermal modes of automated electric drive system during loading under load. *Electrical engineering and electric power*. Zaporozhye: ZNTU, Issue. 4/2020. 82-91.
- [8] Khrebtova O., Zachepa I., Rodkin I., Zachepa N., Khrebtova A. and Kuznetsov V. (2021). Analysis of Vi-broneological Indicators in the Formation of the Moment of Control of the Electric Drive in Special Modes. 2021 *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*.
- [9] Zachepa I., Zachepa N., Khrebtova O., Serhienko I., Shokarov D. and Mykhalchenko G. (2021). Guaranteed and Reliable Excitation of Asynchronous Generator Coupled to Shaft of Vehicle. 2021 *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*.
- [10] Rodkin D.I., Chencheva V.V., Ogar V.A. (2014). The nature of anomalous losses in steel in the deep saturation regime. *Electromechanical and energy saving systems*. No 1, 76-93.
- [11] Ushakov's Explanatory Dictionary. Gufo.me. URL: <https://gufo.me/dict/ushakov> (access date: 18.04.2022).
- [12] GOST IEC 60050-411-2015 International Electro-

- technical Dictionary. Part 411. Rotating machines. Sections 411-52 - Work.
- [13] Wiktionary. Wiktionary. URL: <https://ru.wiktionary.org> (access date: 15.04.2022).
- [14] Technical Railway Dictionary. edited by Eng. NN Vasilieva, prof. ON Isa-akyan, NO Roginsky, Ya. B. Smolyansky, VA Sokovich TS Khachaturov. M.: State Transport Railway Publishing House. 1941
- [15] Andreev V.P., Sabinin Yu.A. (1963). Basics of electric drive. Moscow. Gosenergoizdat, 772.
- [16] Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovsky G.G. (1982). Control of electric drives. Leningrad, Energoizdat.
- [17] Chilikin M.G., Klyuchev V.I., Sandler A.S. (1979). Theory of automated electric drive. Moscow: Energy, 616.
- [18] Glossary of terms of regulatory and technical documentation. Source: <http://find-info.ru/doc/dictionary/normative-technical-documentation/articles/10744/pusk.htm> (access date: 19.04.2022).
- [19] Dynamic loads. Удар https://inmt.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_15053/zaочно/sopromat/Tema_6_i_zadacha_13_Dinamicheskie_nagruzki_Udar.pdf (access date: 18.04.2022).
- [20] Gelfer J.M. (1967). Laws of conservation. Moscow: "Science". 264.
- [21] Frankfurt V.I., (1978). The law of conservation and conversion of energy. Moscow: "Science". 191.
- [22] Filippov B.A., Ilyinsky N.F. (1977). Basics of electric drive. Moscow: MEI.
- [23] Ilyinsky N.F., Kozachenko V.F. (1992). General course of electric drive: A textbook for universities. Moscow: Energoatomizdat.

УДК 621.316.35:006.354

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНУ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ТРОЛЕЙНОГО ШИНОПРОВОДА В УМОВАХ ДІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ

- КОЦУР М.І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kotsur8@gmail.com
- БЕЗВЕРХНЯ Ю.С. д-р філософії (канд. техн. наук), ст. викл. кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: juliakafedraem@gmail.com
- ЯРИМБАШ Д.С. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- КОЦУР І.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com

Мета роботи. Аналіз та дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та тролєями шинопровода в умовах дії вищих гармонік струму, з врахуванням конструктивних особливостей, нелінійності магнітних і електрофізичних властивостей матеріалів, ефектів близькості, поверхневих та зовнішніх поверхневих ефектів.

Методи дослідження. Дослідження проводилися із застосуванням методів теорії електромагнітного поля, теорії електричних кіл, математичної фізики, розв'язанням системи диференціальних рівнянь першого роду, інтерполяції, апроксимації та регресійного аналізу.

Отримані результати. Розроблена імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану (з релейно-контакторною системою та перетворювачем частоти) та струмопровідними елементами системи електропостачання мостового крану. Проведено дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та тролєями шинопровода. Встановлені закономірності втрат напруги в тролєях шинопровода від моменту асинхронного електроприводу, що дозволяють, як при основній так і при вищих гармоніках струму, визначити максимальну допустиму відстань переміщення мостового крану до точки підживлення секції тролєїв шинопровода, при якій забезпечується безаварійна робота електроприводу мостового крану, а також визначити кількість точок підживлення секцій тролєїв шинопровода та відстані між ними, що забезпечить однаковий рівень втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода при основній гармоніці і з врахуванням вищих гармонік струму навантаження.

Наукова новизна. Розроблена імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та струмопровідними елементами системи електропостачання мостового крану, яка дозволяє використовувати інтегровані параметри тролєїв шинопровода за даними польового розрахунку з врахуванням скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів, а також форми та розташування шин (тролєїв) в шинопроводі, відстаней між ними і кількістю фаз шинопровода, в залежності від особливості режимів роботи електроприводу та відстані розташування мостового крану до точки живлення секцій тролєїв шинопровода.

Практична цінність. На основі теоретичного дослідження розроблені рекомендації щодо зменшення втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода від дії вищих гармонік струму навантаження до рівня втрат напруги та активних втрат при основній гармоніці струму.

Ключові слова: тролей, шинопровід, втрати напруги, активні втрати, модель, мостовий кран, гармоніки.

І. ВСТУП

Виробництво металургійної енергоємної продукції, забезпечення технологічних операцій за допомогою застосування підйомно-транспортних механізмів, у тому числі кранових електроприводів в цехах підприємств є дуже енерговитратним. Тому, для модернізації власних енергосистем підприємств металургійної промисловості потрібно застосування сучасних

рішень в області енергоресурсозбереження. Системи цехового електропостачання повинні задовольняти жорстким вимогам високої надійності, ефективності та безпеки, забезпечуючи при цьому високу якість електричної енергії. Сучасні системи цехового електропостачання можуть мати значну довжину яка може бути більше 1000 м. Тому, їх параметри та електромагнітні характеристики мають істотний вплив на якість електроенергії, режими роботи електроприймачів і

енергоефективність технологічних процесів [1]. Широке застосування силових напівпровідникових перетворювачів у всіх галузях промисловості дозволило підвищити енергоефективність промислових установок, знизити споживання електроенергії, підвищити якість виготовленої продукції [2]. Проте впровадження частотно-регульованих електропроводів [3], випрямлячів та інших напівпровідникових перетворювачів [4] призводить до генерації вищих гармонік струму та напруги в шинопроводах, що негативно позначається на коефіцієнті потужності мережі [5]. Наявність вищих гармонік, а також їх відхилення від нормованих значень, негативно впливає на ефективність і надійність елементів системи електропостачання. Вони можуть призводити до істотного збільшення активних та реактивних опорів тролей шинопровода, втрат напруги, активних втрат, зниження коефіцієнта потужності мережі [6]. Так, наприклад, після модернізації систем електроприводів металообробних установок, прокатних станів і мостових кранів у цехах Запорізького ливарно-механічного заводу, що входить до найбільшої міжнародної гірничо-металургійної групи Metinvest, виникла проблема втрати потужності та напруги системи живлення мостових кранів, що в результаті призвело до значного зниження пускового моменту асинхронних двигунів мостового крана на відстані $2/3$ і повної його зупинки приблизно на $3/4$ від повної протяжності прольоту цеху. Це значною мірою призводить до обмеження потужності цехових електроприймачів та порушення виробничо-технологічних операцій на етапах виготовлення та транспортування продукції.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для оцінки падіння напруги, залежно від коефіцієнта потужності мережі, застосовуються класичні методи для тролів шинопровода виготовлених із сталі [7] та для тролів шинопровода виготовлених із кольорових металів [8]. Вони засновані на емпіричних залежностях та не враховують геометрію активних матеріалів, їх електромагнітні властивості, частоту основної гармоніки струму, поверхневі ефекти, ефекти близькості тощо. У роботі [9] авторами було запропоновано вдосконалену методику визначення втрат напруги в шинопроводах з урахуванням частоти основної та вищих гармонік струму, а також виконано їх порівняльну оцінку при допустимому гармонічному складі струму, регламентованому стандартом [10], [11]. За результатом оцінки було показано, що при дії вищих гармонік перевищення втрат напруги щодо основної гармоніки становить $1,13 \div 2,5$ раз, залежно від коефіцієнта короткого замикання [12]. Однак ці результати були отримані з припущенням про відсутність впливу ефекту близькості та скін-ефекту. Так як дія ефекту близькості та скін-ефекту посилюються при дії вищих гармонік, згідно з [13], застосування методик [9],[12] не дозволяє забезпечити необхідну точність та достовірність результатів, вплив гармонійного складу струмів та напруг, нелінійності влас-

тивостей активних матеріалів, поверхневі ефекти, ефекти близькості тощо. Альтернативною методикам, заснованих на узагальнених висловлюваннях та емпіричних залежностях, можливо застосування методів розрахунку електромагнітних параметрів і на основі польового моделювання [14]. Застосування методів розрахунку на основі польового моделювання набуло поширення для широкого класу завдань електротехніки [15]-[16]. Однак його комп'ютерна реалізація на основі методів кінцевих елементів у компонентних областях активної частини з нелінійними електрофізичними властивостями ускладнена великими витратами часу та вимогами до обчислювальних ресурсів. У роботі [16] пропонується визначати електромагнітні параметри електротехнічних систем перетворення змінного струму на основі реалізації моделі електромагнітного поля для завдання у time step формулюванні. Такий підхід дозволяє враховувати нелінійність властивостей активних матеріалів, гармонійний склад струмів та напруг, але потребує значних витрат часу на чисельну реалізацію через необхідність збіжності розрахунку кожного часового шару. У роботах [17], [18] була запропонована польова модель у частотному формулюванні. Такий підхід вимагає значно менших витрат часу на чисельну реалізацію та дозволяє врахувати окремо вплив кожної гармонійної складової струму та напруги на параметри та характеристики шинопроводів. За допомогою польової моделі в частотному формулюванні [18] запропонована вдосконалена модель для визначення падіння напруги в залежності від коефіцієнта потужності мережі, що має високу точність та ефективність.

Таким чином актуальним завданням є проведення дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводом механізму переміщення та струмопроводними елементами мостового крана, для визначення електромагнітних параметрів в залежності від відстані розташування мостового крана до точки живлення тролей шинопровода, та розробка рекомендацій щодо збереження допустимих значень втрат напруги в троліях шинопровода при дії вищих гармонік струму у мережі цехового електропостачання.

III. МЕТА РОБОТИ

Аналіз та дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та троліями шинопровода в умовах дії вищих гармонік струму, з урахуванням конструктивних особливостей, нелінійності магнітних і електрофізичних властивостей матеріалів, ефектів близькості, поверхневих та зовнішніх поверхневих ефектів.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для проведення досліджень втрат напруги, активних втрат в троліях шинопровода при роботі механі-

зму переміщення мостового крану, розроблена імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між струмоприймачами механізму переміщення мостового крану і струмопровідними елементами системи електропостачання мостового крану, яка дозволяє використовувати інтегровані параметри шинопровода за даними польового розрахунку з врахуванням скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів, форми і розташування шин (тролеїв), відстаней між ними і кількості фаз шинопровода, в залежності від особливості режимів роботи струмоприймачів. Структурна схема імітаційної моделі (рис. 1) містить імітаційні підмоделі шинопровода, перетворювачі частоти з асинхронними двигунами (АД), що мають короткозамкнений ротор.

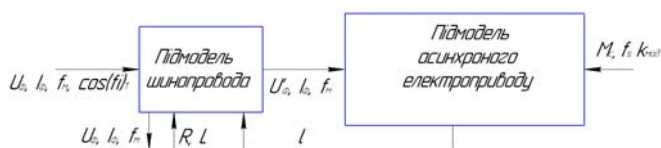


Рисунок 1. Структурна схема імітаційної моделі взаємопов'язаних електромагнітних процесів між струмоприймачем та елементами системи електропостачання цеху

Імітаційна модель реалізована в структурі засобу Simulink програмного забезпечення MatLAB з інтеграцією програмного забезпечення Comsol Multiphysics за допомогою модуля LiveLink.

При розробці імітаційної моделі прийняті наступні припущення [19]:

- струмопровідна система від живлячого трансформатора до тролейного шинопровода має значно не велике та постійне значення активного та реактивного опорів, та при моделюванні не враховується;

- напруга мережі має синусоїдальну форму, амплітуда якої має постійне значення, виконується симетрія фазної напруги;

- коефіцієнт потужності мережі визначається додаванням індуктивності живлячої мережі L_s .

Підмодель шинопровода в структурі засобу Simulink реалізовано за допомогою стандартних елементів активного опору та індуктивності відповідно до кожної фази. Вхідними параметрами підмоделі шинопровода є фазна напруга U_ϕ , струм I_ϕ , частота f_m та коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1$ мережі. Також до вхідних параметрів підмоделі шинопровода відносяться результуючі значення активного опору R , індуктивності L та величина відстані l між точкою живлення тролей шинопровода та точкою приєднання струмоприймачів механізму переміщення мостового крану. Активний опір R та індуктивність L є залежними від довжини l шин та визначаються за допомогою польового моделювання з врахуванням гео-

метричної форми, розмірів та відстаней між шинами. При імітаційному моделюванні електромагнітних процесів в тролей шинопровода падіння напруги визначається за повним опором тролей шинопровода [6]. Для розрахунку параметрів R та L в польовій моделі [16] на етапі налагодження імітаційної моделі, в залежності від особливості роботи струмоприймачів механізму переміщення мостового крану, визначається гармонійний склад струму. Для тролейного шинопровода l є змінною величиною, яка залежить від переміщення мостового крану.

Вихідними параметрами підмоделі шинопровода є напруга U'_ϕ , струм I_ϕ , частота мережі f_m , та розраховані значення втрат напруги у фазах А, В, С [182]:

$$\Delta U|_{A,B,C} = U_\phi|_{A,B,C} - U'_\phi|_{A,B,C}, \quad (1)$$

та активні втрати [181]:

$$\Delta P|_{A,B,C} = \cdot i^2|_{A,B,C} \cdot R_{рез}|_{A,B,C}. \quad (2)$$

Підмодель асинхронного електроприводу складається з підмоделі АД та перетворювача частоти. В імітаційній моделі перетворювач частоти використовується в якості генератора вищих гармонік струму, а АД - змінного навантаження. Вони не є предметом дослідження, тому скористаємось їх відомими моделями [20]. Для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором використовується стандартна найпоширеніша двофазна математична модель в d-q координатах з урахуванням загальноприйнятих припущень [21]. Для перетворювача частоти використовується стандартна найпростіша модель, яка враховує загальноприйняті припущення [22]. В трифазних інверторах з ШІМ за синусоїдальним законом реактивна енергія повністю скомпенсована за вихідною частотою. Це свідчить про те, що коефіцієнт потужності K_M , без врахування кута комутації вентилів, залежить переважно від індуктивності фільтра L_0 та індуктивності живлячої мережі L_s . Так як імітаційне моделювання виконується для окремої ланки цехової мережі, а коефіцієнт потужності ланки цехової мережі буде визначатися коефіцієнтом потужності K_M перетворювача, то для врахування перетікання реактивної потужності між струмоприймачами мережі цеху до джерела напруги додається індуктивність живлячої мережі L_s для регулювання коефіцієнта потужності мережі в межах $\cos \varphi_1 = 0,5 \div 1$.

Враховуючи те, що системи цехового електропостачання мають різну будову, конструкцію та конфігурацію, яка визначається специфікою та особливос-

тями технологічних процесів, дослідження електромагнітних процесів в трелеях шинопровода проводились на прикладі роботи механізму переміщення існуючого мостового крана 32т механічного цеху ТОВ «ЗЛМЗ» (ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод»), що входить до гірничо-металургійної групи ТОВ «Метінвест Холдинг». За наданими даними ТОВ «ЗЛМЗ» у механічному цеху розташовано два однакових мостових крана, які працюють незалежно один від одного. Мостові крани мають єдину струмопровідну систему живлення, що виконана з трелейного трифазного шинопровода, та містить 12 секцій. Довжина 10-ти трелейних секцій складає 12м, а 11-та та 12-та секції є ремонтні, довжина яких складає 2м. Загальна протяжність прольоту складає 120м. Тролей шинопровода виконані зі сталевого куткового профілю 75x75x10мм. Всі секції, окрім ремонтної, з'єднані послідовно та мають єдину точку живлення. Мостовий кран має чотири мотор-редуктори з двигунами типу серії МТН-312-6 потужністю 15кВт (ПВ-40) з релейно-контакторною системою регулювання частоти обертання ротора.

На основі даних імітаційного моделювання отримано сімейство залежностей середнього значення втрати напруги між фазами А, В, С (рис. 2, а) та активних втрат (рис. 2, б) в залежності від відстані розташування мостового крана до точки живлення трелейного шинопровода при релейно-контакторній системі регулювання електропривода мостового крану (при дії основної гармоніки струму) для моментів опору АД $M_c = 0,3M_n$, $M_c = 0,7M_n$ та $M_c = M_n$.

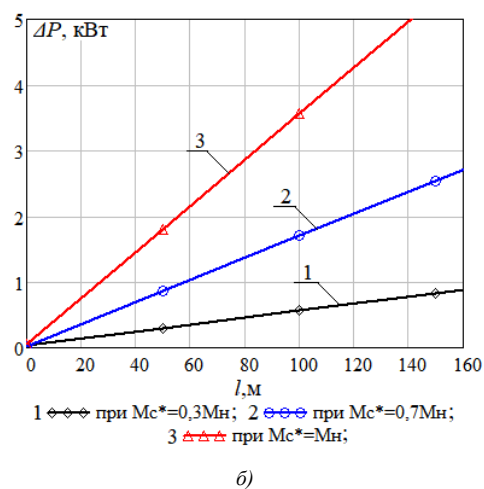
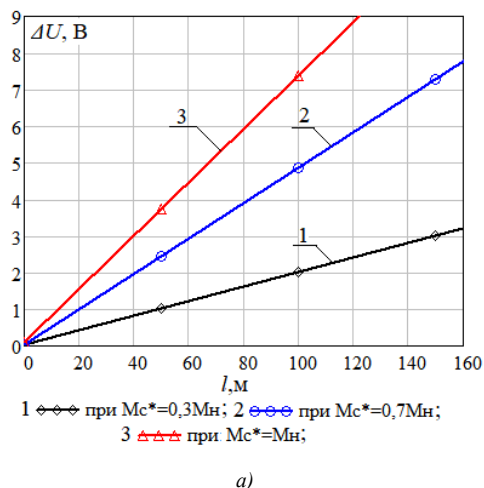
Як показує аналіз, при збільшенні відстані розташування мостового крана до точки живлення трелейного шинопровода падіння напруги та активних втрат в трелейному шинопроводі зростають за лінійним законом. При переміщенні крана до кінця прольоту (120м) падіння напруги на основній гармоніці струму буде складати $\Delta U = 2,5\text{В}$ при $M_c = 0,3M_n$;

$\Delta U = 5,85\text{В}$ при $M_c = 0,7M_n$ та $\Delta U = 8,85\text{В}$ при

$M_c = M_n$. При цьому, падіння напруги при різних значеннях навантаження не повинно досягати припустимого значення для кранового обладнання $\Delta U\% - 5\%$. Не симетрія за ефективним значенням фазної напруги не перевищує 3,2%. При переміщенні крана до кінця прольоту активні втрати в трелеях шинопровода на основній гармоніці струму будуть складати

$\Delta P = 0,78\text{кВт}$ при $M_c = 0,3M_n$; $\Delta P = 2,05\text{кВт}$ при

$M_c = 0,7M_n$ та $\Delta P = 4,2\text{кВт}$ при $M_c = M_n$.



а) падіння напруги; б) активні втрати.

Рисунок 2. Залежності падіння напруги та активних втрат в трелейному шинопроводі в залежності від відстані мостового крана до точки живлення при основній гармоніці струму

На основі даних імітаційного моделювання отримані коефіцієнти змінних складових падіння напруги та активних втрат в трелеях шинопровода від ударного струму в перехідному режимі роботи асинхронних двигунів привода механізму переміщення мостового крана при їх прямому пуску з навантаженням, в залежності від відстані l положення мостового крана до точки живлення трелейного шинопровода (табл. 1). Коефіцієнт змінної складової падіння напруги представляє собою відношення значення падіння напруги в момент пуску до значення падіння напруги в трелеях шинопровода в усталеному режимі роботи привода механізму переміщення мостового крана:

$$K_{3M}^U \Big|_l = \frac{\Delta U_{max}^{3M}}{\Delta U_{cm}^U} \Big|_l, \quad (3)$$

де ΔU_{max}^{3M} - максимальне значення падіння напруги в троліях шинопровода в момент пуску АД при дії ударного струму; $\Delta U_{cm}^U|_l$ - значення падіння напруги в усталеному режимі роботи при відповідному значенні l .

Коефіцієнт змінної складової активних втрат:

$$K_{3M}^P|_l = \frac{\Delta P_{max}^{3M}}{\Delta P_{cm}^U|_l}, \quad (4)$$

де ΔP_{max}^{3M} - максимальне значення активних втрат в троліях шинопровода в момент пуску АД при дії ударного струму; $\Delta P_{cm}^U|_l$ - значення активних втрат в усталеному режимі роботи при відповідному значенні l .

Таблиця 1. Коефіцієнти змінних складових втрат напруги та активних втрат в тролієвому шинопроводі при прямому пуску АД

Відстань положення мостового крана l , м	Час розгону АД (час перехідного процесу), сек	K_{3M}^U , в.о.	K_{3M}^P , в.о.
при $M_c = 0,7M_n$			
2	0,73	4,5	4,62
50	0,98	4,32	4,47
100	1,2	4,18	3,8
150	2,0	4,1	3,04
200	2,3	3,6	2,76
при $M_c = M_n$			
2	1,3	3,05	24
50	1,85	2,82	21
100	2,8	2,67	18
150	3,3	2,56	15,7
200	4,2	2,39	13,25

Як показує аналіз, при $l=2$ м, що відповідає положенню мостового крана на початку прольоту, змінні складові втрат напруги та активні втрати в троліях шинопровода будуть мати найбільші значення, що викликано ударною складовою пускового струму АД. При збільшенні l , за рахунок зростання активного опору тролієвого шинопровода, коефіцієнти K_{3M}^U та K_{3M}^P будуть зменшуватись, а час перехідного процесу, тобто час розгону АД буде зростати. При більшо-

му значенні навантаження АД час перехідного процесу та коефіцієнт K_{3M}^P будуть зростати, що також пов'язано зі зростанням ударного струму. При цьому, коефіцієнт K_{3M}^U при зростанні навантаження АД буде зменшуватись, що пов'язано зі зростанням значення втрат напруги ΔU_{cm}^U при усталеному режимі роботи. Так як ударна складова струму пропорційно змінюється в залежності від кількості ступенів регулювання частоти обертання ротора АД релейно-контакторної системи [193], то відповідно до цього, в залежності від кількості ступенів та величини опору резисторів релейно-контакторної системи, коефіцієнти K_{3M}^U , K_{3M}^P теж змінюються пропорційно.

На основі результатів імітаційного моделювання встановлено, що при збільшенні l напруга, що підводиться до статорної обмотки, зменшується на величину втрат напруги в троліях шинопровода. При цьому, активна потужність, що споживається АД, не залежно від відстані розташування мостового крана l не змінюється, та визначається робочою характеристикою $\xi = f(P_2)$ при відповідному значенні механічної потужності P_2 АД. Тому, для підтримання активної потужності P_1 , що споживається АД, має місце зростання струму навантаження. Таким чином, для $M_c = 0,7M_n$ струм в троліях шинопровода при зміні $l=2\div 200$ м за дійсним свої значенням збільшується від 96,3А до 101,5А; для $M_c = M_n$ від 133А до 145,5А. Збільшення струму, який за значенням вище свого розрахункового рівня, призводить до додаткового падіння напруги та збільшенню активних втрат в троліях шинопровода і до струмового перевантаження АД, отже до його перегрівання та скорочення строку його експлуатації. Окрім цього, має місце зменшення перевантажувальної здібності АД як для механізму переміщення крана, так і для підйомного механізму та механізму переміщення візка. Це супроводжується зменшенням максимального моменту, отже пускового моменту АД (рис. 3).

При $\Delta U=55$ В значення максимального моменту досягає моменту навантаження $M_c = M_n$ АД, що може призвести до його "прокинення". Криву залежності $M_{max}^* = f(\Delta U)$ можна розбити на дві ділянки. Перша ділянка представляє прямолінійну залежність в діапазоні зміни $\Delta U=(0\div 18)$ В, друга ділянка – експоненційну залежність в діапазоні зміни $\Delta U=(18\div 80)$ В. Прямолінійній ділянці залежності $M_{max}^* = f(\Delta U)$ відповідає прямолінійне прирощення

струму навантаження відносно прирощення падіння напруги ($\Delta U = 0 \div 18\text{В}$). Нелінійній ділянці, коли $\Delta U \geq 18\text{В}$, відповідає нелінійне прирощення струму навантаження відносно прирощення падіння напруги в трелеях шинопровода. Це викликано тим, що при $\Delta U \geq 18\text{В}$ для підтримання активної потужності P_1 , що споживається АД, стрімко зростає струм навантаження, що в свою чергу призводить до ще більшого падіння напруги та зростання активних втрат в трелеях шинопровода.

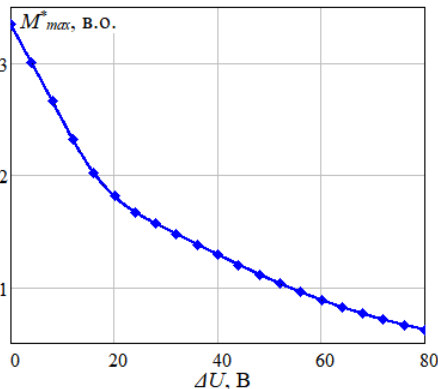


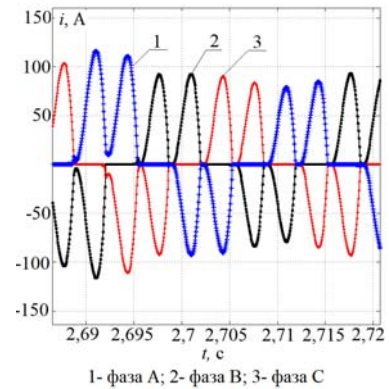
Рисунок 3. Залежність максимального моменту АД типу МТН-312-6 потужністю 15кВт від падіння напруги в трелеях шинопровода

Таким чином, враховуючи вище наведене, для недопущення аварійного режиму роботи електроприводу крана, особливо для способів регулювання швидкості обертання роторів АД, для яких перехідний режим їх роботи супроводжується ударними складовими струму та напруги, при проектуванні нових та експлуатації існуючих систем живлення мостових кранів необхідно проводити попередній розрахунок втрат напруги та активних втрат в їх елементах не тільки в усталеному, а також і у перехідних режимах роботи електроприводів різних механізмів мостового крану.

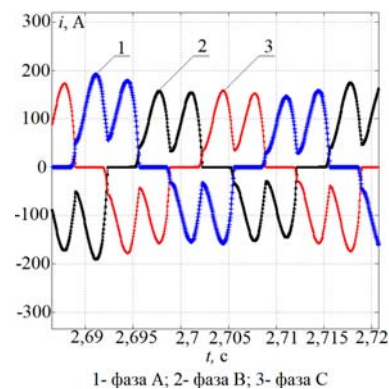
За допомогою імітаційного моделювання проведено дослідження втрат напруги та активних втрат при роботі АД з ПЧ механізму переміщення мостового крану. На рис. 4 наведені осцилограми фазних струмів в трелеях шинопровода при роботі електроприводу з ПЧ механізму переміщення мостового крану для моментів опору $M_c = 0,3M_n$, $M_c = 0,7M_n$ та

$M_c = M_n$ АД типу МТН-312-6 потужністю 15кВт (ПВ-40). Гармонійний склад фазних струмів для різних значень навантаження наведено на рис. 5. При збільшенні навантаження коефіцієнт гармонійних спотворень зменшується. При цьому, переважними складовими вищих гармонік струму є гармоніки 5, 7, 11 та 13, але з [13] відомо, що, на параметри трелеїв шинопровода не впливає амплітуда вищих складових струму, а впливає тільки їх частота, що обумовлено

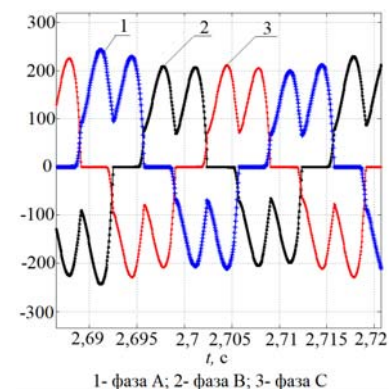
впливом скін-ефекту та поверхневим ефектом. Хоча амплітуди вищих гармонік струму $I_k/I_1 \leq 5\%$ в більшій мірі не впливають на результуюче значення струму, але при визначенні параметрів трелеїв шинопровода потрібно враховувати всі існуючі складові гармоніки струму.



а)



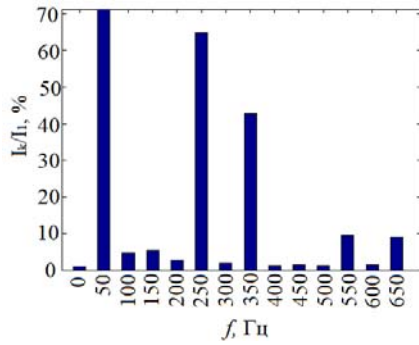
б)



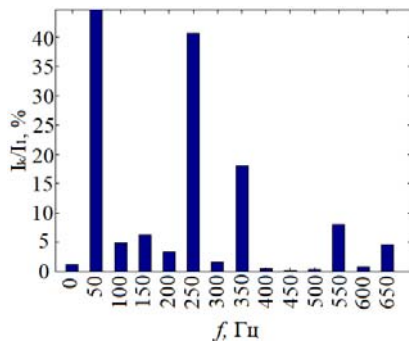
в)

а) при $M_c = 0,3M_n$; б) при $M_c = 0,7M_n$; в) при $M_c = M_n$.

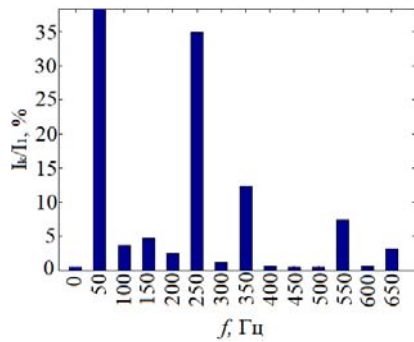
Рисунок 4. Осцилограми фазних струмів в трелеях шинопровода при різних значеннях навантаження електроприводу механізму переміщення мостового крану



а)



б)



в)

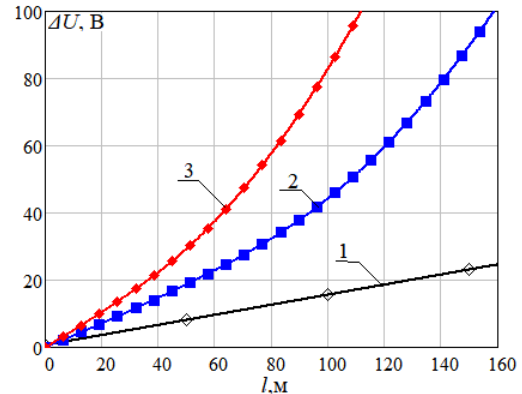
а) при $M_c = 0,3M_n$ ($THD_I=79,6\%$); б) при $M_c = 0,7M_n$

($THD_I=46,59\%$); в) при $M_c = M_n$ ($THD_I=38,71\%$).

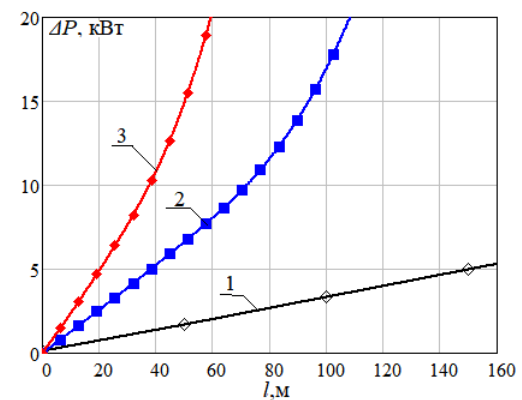
Рисунок 5. Гармонійний склад фазних струмів в троліях шинопровода в при різних значеннях навантаження електропривода механізму переміщення мостового крана

На основі даних імітаційного моделювання отримано сімейство залежностей середнього значення втрат напруги між фазами А, В, С (рис. 6, а) та активних втрат (рис. 6, б) від відстані розташування мостового крана до точки живлення тролієвого шинопровода при частотному регулюванні електропривода мостового крана для моментів опору $M_c = 0,3M_n$,

$M_c = 0,7M_n$ та $M_c = M_n$. Як показує аналіз, при



а)



б)

а) падіння напруги; б) активні втрати.

Рисунок 6. Залежності падіння напруги та активних втрат в тролієвому шинопроводі від відстані мостового крана до точки живлення при частотному регулюванні

збільшенні відстані l мостового крана до точки живлення тролієвого шинопровода, падіння напруги та активні втрати в тролієвому шинопроводі з врахуванням вищих гармонік струму при частотному регулюванні, як і при релейно-контакторному регулюванні АД (при врахуванні основної гармоніки струму) при $M_c = 0,3M_n$ зростають за лінійним законом. Для

моментів навантаження $M_c = 0,7M_n$ та $M_c = M_n$ залежність падіння напруги та активних втрат від відстані l у діапазоні $l=(0\div 18)$ м буде мати лінійну ділянку, як і залежність максимального моменту АД від падіння напруги в троліях шинопровода

$M_{max}^* = f(\Delta U)$ (рис. 3). При $l > 18$ м падіння напруги та активні втрати в троліях шинопровода будуть змінюватись за нелінійним законом, що викликано поперше, збільшенням активного опору тролієв при дії

вищих гармонік струму відносно власного значення при основній гармоніці струму в 4,074 раз, та повного реактивного опору в 8,3 раз; по-друге збільшенням струмового навантаження від 94,6А до 139,5А при $M_c = 0,7M_n$ та (133÷192)А при $M_c = M_n$ для підтримання споживання АД активної потужності внаслідок зменшення вхідної напруги електроприводу. При переміщенні мостового крана на відстань $l=130\text{м}$ при $M_c = 0,7M_n$ та на $l=75\text{м}$ при $M_c = M_n$ згідно рис.3 настане аварійний режим роботи електроприводу, що викликано умовою $M_{max} < M_n$, при цьому, значення активних втрат в троліях шинопровода буде значно перевищувати $\Delta P \gg 20\text{кВт}$, що призведе до значного перегріву тролієв шинопровода та аварійного стану всієї цехової мережі. Для забезпечення нормальної роботи мостового крана та живлення систем електроприводу при застосуванні систем електроприводу механізмів мостового крана з частотним регулюванням необхідно збільшити кількість точок підживлення тролієв шинопровода.

Для визначення кількості точок підживлення та відстані між підживлюючими тролійними компенсаторами необхідно, щоб значення втрат напруги, при врахуванні дії вищих гармонік струму, не перевищувало значення втрат напруги при дії основної гармоніки струму на максимальній відстані переміщення мостового крана. При цьому, необхідно щоб виконувалась умова $\Delta U\% \leq 5\%$. Таким чином, використовуючи залежності (рис. 2 та рис. 6) при навантаженні

$M_c = M_n$ оптимальна відстань між тролійними компенсаторами повинна складати не більше $l \leq 16,2\text{м}$. При цьому, $\Delta U_{рез} = 8,5\text{В}$ (при основній гармоніці струму для максимальної робочій відстані роботи мостового крана $l=120\text{м}$ $\Delta U_l = 8,8\text{В}$). Кількість точок підживлення тролієвого шинопровода повинно бути $n \geq 8$. Як було зазначено вище, довжина секції тролієв в механічному цеху складає 12м, тому до кожної секції необхідно підводити тролієвий компенсатор для компенсації втрат напруги. При цьому, результуюче значення падіння напруги буде дорівнювати $\Delta U_{рез} = 5,5\text{В}$, а результуюче значення активних втрат при дії вищих гармонік струму $\Delta P_{рез} = 2,7\text{кВт}$, що на 35,7% менше ніж значення активних втрат в троліях шинопровода при дії основної гармоніки струму на максимальній відстані роботи мостового крана (при $l=120\text{м}$ $\Delta P_l = 4,2\text{кВт}$).

На основі проведеного дослідження щодо впливу вищих гармонік струму, які виникають при роботі нелінійних навантажень (напівпровідникові перетворювачі), на параметри, а також на падіння напруги і активні втрати в троліях шинопровода необхідно:

- до модернізації електроприводів механізмів мостового крана з релейно-контакторним регулюванням на частотно-регульований електропривод (або інших на базі напівпровідникових пристроїв) враховувати дані виробника щодо магнітної сумісності перетворювача з мережею електропостачання, та визначити з високою точністю зміну параметрів тролієв шинопровода, а також проводити оцінку втрат напруги та активних втрат в залежності від особливості роботи мостового крана, будови та конфігурації системи тролієвого струмопровода;

- в залежності від отриманих попередніх розрахунків параметрів, падіння напруги та активних втрат в троліях шинопровода, згідно допустимих значень падіння напруги для кранового обладнання ($\Delta U\% \leq 5\%$) та граничного значення активних втрат, при яких задовольняється умова нагріву тролієв шинопровода, визначити граничну довжину секції або групи секцій тролієв, та кількість точок їх підживлення;

- при відсутності можливості зміни конфігурації системи підживлення секцій тролієв шинопровода, необхідно провести розрахунок обмеження встановленої потужності механізмів мостового крана, та граничної довжини переміщення мостового крана від точки підживлення;

- для обмеження впливу вищих гармонік струму застосовувати 12-ти та 18-ти пульсні випрямлячі для ПЧ, що дозволить виключити 5-ту та 7-му гармоніки (12-ти пульсний випрямляч) та 11-ту та 13-ту гармоніки (18-ти пульсний випрямляч) струму.

- для системи керування ПЧ передбачити її захист від падіння напруги нижче допустимого значення, так як живлення контролеру ПЧ відбувається від кола постійного струму;

Для підвищення ефективності роботи електроприводів мостового крана, розроблені рекомендації дозволять зменшити втрати напруги та активні втрати в троліях шинопровода від дії вищих гармонік струму навантаження до рівня втрат напруги та активних втрат при основній гармоніці струму.

V. ВИСНОВКИ

Розроблена імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крана (з релейно-контакторною системою та ПЧ) та струмопровідними елементами системи електропостачання мостового крана, яка дозволяє використовувати інтегровані параметри тролієв шинопровода за даними польового розрахунку з врахуванням скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів, а також форми та розташування шин (тролієв) в шинопроводі, відстаней між ними і кількістю фаз шинопровода, в залежності від особливості режимів роботи електроприводу та відстані розташування мостового крана до точки живлення секцій тролієв шинопрово-

да.

Проведено дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та тролєями шинопровода. Встановлені закономірності втрат напруги в тролєях шинопровода від моменту асинхронного електроприводу, що дозволяють, як при основній так і при вищих гармоніках струму, визначити максимальну допустиму відстань переміщення мостового крану до точки підживлення секції тролєїв шинопровода, при якій забезпечується безаварійна робота електроприводу мостового крану, а також визначити кількість точок підживлення секцій тролєїв шинопровода та відстані між ними, що забезпечить однаковий рівень втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода при основній гармоніці і з врахуванням вищих гармонік струму навантаження.

На основі теоретичного дослідження розроблені рекомендації щодо зменшення втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода від дії вищих гармонік струму навантаження до рівня втрат напруги та активних втрат при основній гармоніці струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Zare , F. Reduced layer planar busbar for voltage source inverters [Text] / F. Zare, G. F. Ledwich // IEEE Trans. Power Electron. – 2002. – Vol. 17. – №. 4. – pp. 508–516.
- [2] Gaoyu, Z. Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter [Text] / Z. Gaoyu, Z. Zhengming, Y. Liqiang // IEEE:Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC): Intern. Scient. and Tech. Conf., 15-17 July 2013: report theses. Long Beach, CA, USA. - pp. 1213- 1218. DOI:10.1109/APEC.2013.6520453
- [3] Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // IEEE: 14-th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018): Intern. Scient. and Tech. Conf., 20-23 February 2018: report theses. - Lviv-Slavske, Ukraine. - pp. 304-307. DOI:10.1109/TCSET.2018.8336208
- [4] Kotsur, M.I. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme [Text] / M.I. Kotsur, P.D. Andrienko, I. M. Kotsur, O.V Bliznyakov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – 2017. - №4 – P. 49-54
- [5] Bedkowski, M. Coupled numerical modelling of power loss generation in busbar system of low-voltage switchgear [Text] / M. Bedkowski, J. Smolka, K. Banasiak, Z. Bulinski, A. J. Nowak, T. Tomanek, A. Wajda // Int. J. Thermal Sci. – 2014. – vol. 82. – pp. 122–129.
- [6] Plesca, A. Busbar heating during transient conditions [Text] / A. Plesca // Electric Power Syst. Res. – 2012. – № 89. – pp. 31–37. DOI: 10.1109/T-AIEE.1915.4765211
- [7] Федоров А.А. Справочник энергетика промышленных предприятий Т. 1. Электроснабжение. [Текст] / Под общей ред. Федорова А. А. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1987. - 840 С.
- [8] Рапутов, Б. М. Электрооборудование кранов металлургических предприятий [Текст] / Б. М. Рапутов. - М.: Металлургия, 1990 - 272 с.
- [9] Rosskopf, A. Influence of inner skin- and proximity effects on conduction in litz wires [Text] / A. Rosskopf, E. Bar, C. Joffe // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – № 29(10). – pp. 5454–5461, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2293847
- [10] МЭК (61000-3-12:2004) Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения общего назначения. Нормы и методы испытаний.
- [11] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems [Text] / IEEE standard 519-1992, London. - 1992.
- [12] Popa, I. Numerical modeling of DC busbar contacts [Text] / I. Popa, A.I. Dolan // IEEE: 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012): Intern. Scient. and Tech. Conf., 15-17 September 2012: report theses. Long Beach, CA, USA. - pp. 188- 193 DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231869
- [13] Безверхня, Ю.С. Аналіз параметрів шинопроводів цехових мереж в умовах дії вищих гармонік струму [Текст] / Ю. С. Безверхня, М. І. Коцур, Д.С. Яримбаш, І. М. Коцур, С.Т. Яримбаш, І.М. Килимник// Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – № 4. – С. 51-63. – Режим доступу : DOI :10.15588/1607-6761-2018-4-5.
- [14] Безверхня, Ю. С. Підвищення ефективності визначення параметрів тролейних шинопроводів на основі польового моделювання [Текст] / Ю. С. Безверхня, М. І. Коцур, Д. С. Яримбаш, І. М. Коцур // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2021. – №2 (3), С. 38-43. – Режим доступу: DOI: 10.20998/2224-0349.2021.02.05.
- [15] Kotsur, M. Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation [Text] / M.I. Kotsur, D.S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, doi:

10.1109/PAER49887.2020.9240811

- [16] Коцур, М.І. Особливості польового моделювання електромагнітних процесів тролейного шинопровода [Текст] / Коцур, М.І., Яримбаш, Д.С., Безверхня, Ю.С., Дівчук, Т.Є. // Електротехніка та електроенергетика. – 2021. – № 1. – С. 46-60. – Режим доступу: DOI : 10.15588/1607-6761-2021-1-5
- [17] Kotsur, M. I. New approach for voltage drop estimation in the busbars of workshop networks at higher current harmonics influence [Text] / M. I. Kotsur, D. S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // Problemele energeticii regionale. – 2019. – №1(39). – Р. 43-56. – Режим доступу: DOI: 10.5281/zenodo.2650419
- [18] Kotsur, M. I. Accuracy Improvement for the Determination of Parameters and Voltage Drops in Busbars, Considering the Networks Power Factor [Text] / M. I. Kotsur, D. S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // Problemele energeticii regionale. – 2021. – №3(51). – Р. 37-52. – Режим доступу: DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.04>.
- [19] Kotsur, M. I. Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions [Text] / M. I. Kotsur, I.M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), November 15th - 17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 2017, pp. 88-91. DOI:10.1109/MEES.2017.8248960
- [20] Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
- [21] Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб. Питер, 2008. – 288 с.
- [22] Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие / С. Г. Герман-Галкин; –СПб.: Крона принт, 2001. – 320 с.

Стаття надійшла до редакції 31.05.2022

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА ПРИ ПИТАНИИ ОТ ТРОЛЛЕЙНОГО ШИНОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА

КОЦУР М.И.	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: kotsur8@gmail.com
БЕЗВЕРХНЯЯ Ю.С.	д-р философии (канд. техн. наук), ст. преп. кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: juliakafedraem@gmail.com
ЯРЫМБАШ Д.С.	д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: yarymbash@gmail.com;
КОЦУР И.М.	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com

Цель работы. Анализ и исследование взаимосвязанных электромагнитных процессов между электроприводами механизма перемещения мостового крана и троллеями шинопровода в условиях действия высших гармоник тока, с учетом конструктивных особенностей, нелинейности магнитных и электрофизических свойств материалов, эффектов близости, поверхностных и внешних поверхностных эффектов.

Методы исследования. Исследования проводились с применением методов теории электромагнитного поля, теории электрических цепей, математической физики, решения системы дифференциальных уравнений первого рода, интерполяции, аппроксимации и регрессионного анализа.

Полученные результаты. Разработана имитационная модель взаимосвязанных электромагнитных процессов между электроприводами механизма перемещения мостового крана (с релейно-контакторной системой и преобразователем частоты) и токопроводящими элементами системы электроснабжения мостового крана. Проведены исследования взаимосвязанных электромагнитных процессов между электроприводами механизма перемещения мостового крана и троллеями шинопровода. Установлены закономерности потерь напряжения в троллеях шинопровода от момента асинхронного электропривода, позволяющие, как при основной, так и при высших гармониках тока, определить максимальное допустимое расстояние перемещения мостового крана до точки подпитки секции троллея шинопровода, при которой обеспечивается безаварийная работа, а также определить количество точек подпитки секций троллея шинопровода и расстояния между ними, что обеспечит одинаковый уровень потерь напряжения и активных потерь в троллеях шинопровода при основной гармонике, и с учетом высших гармоник тока нагрузки.

Научная новизна. Разработана имитационная модель взаимосвязанных электромагнитных процессов между электроприводами механизма перемещения мостового крана и токопроводящими элементами системы электроснабжения мостового крана, которая позволяет использовать интегрированные параметры троллеев шинопровода по данным полевого расчета с учетом скин-эффекта, эффекта близости, поверхностных и других эффектов, а также формы и расположения шин (троллеев) в шинопроводе, расстояний между ними и количеством фаз шинопровода, в зависимости от особенности режимов работы электропривода и расстояния расположения мостового крана до точки питания секций троллеев шинопровода.

Практическая ценность. На основе теоретического исследования разработаны рекомендации по уменьшению потерь напряжения и активных потерь в троллеях шинопровода от действия высших гармоник тока нагрузки до уровня потерь напряжения и активных потерь при основной гармонике тока.

Ключевые слова: троллей, шинопровод, потери напряжения, активные потери, модель, мостовой кран, гармоники.

PECULIARITIES OF OVERHEAD CRANE MOVEMENT MECHANISM OPERATION WHEN POWERED BY A BUSBAR'S TROLLEY AT ACTION OF HIGHER CURRENT HARMONICS

KOTSUR M.I.

Ph. D, Associate professor, Associate professor of the electrical and electronic apparatuses department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kotsur8@gmail.com;

BEZVERKHNIA Yu.S.

Ph. D, Senior lector electrical machine department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: juliakafedraem@gmail.com;

YARYMBASH D.S.

Sci. D, head of electrical machine department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com

KOTSUR I.M.

Ph. D, Associate professor, Associate professor of the electrical machine department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com;

Purpose. Analysis and research of interconnected electromagnetic processes between electric drives of overhead crane moving mechanism and trolleys under conditions of higher current harmonics, taking into account design features, nonlinearity of magnetic and electrophysical properties of materials, proximity effects, surface and external surface effects.

Methodology. The research was carried out using methods of electromagnetic field theory, electrical circuit theory, mathematical physics, solving a system of first order differential equations, interpolation, approximation and regression analysis.

Findings. A simulating model of interrelated electromagnetic processes between electric drives of an overhead crane mechanism and current-conducting elements of the power supply system of an overhead crane has been developed. Investigations of electromagnetic processes between the electric drives of the overhead crane mechanisms and the trolleys have been carried out. The laws of voltage losses in the busbar's trolleys from the torque of the asynchronous electric drive have been established. This allowed to determine the maximum permissible distance of overhead crane movement to the feeding point of the busbar's trolley section, at which trouble-free operation is ensured as well as to determine the number of feeding points of the busbar's trolley sections and the distance between them. This will ensure the same level of voltage losses and active losses in the trolleys at the fundamental harmonic, and taking into account the higher harmonics of the load current.

Originality. A simulating model of interrelated electromagnetic processes between electric drives of an overhead crane mechanism and current-conducting elements of the power supply system of an overhead crane has been developed. which allows to use integrated parameters of busbar trolleys according to field calculation taking into account skin effect, the shape and location of tires (trolleys) in the busbar, the distances between them and the number of phases of the busbar, depending on the peculiarities of the modes of operation of the electric drive and the distance of the bridge crane to the power point of busbar trolley sections

Practical value. Based on the theoretical research, recommendations to reduce voltage losses and active losses in the trolley from the action of higher harmonic loads to the level of voltage losses and active losses at the fundamental harmonic current have been developed.

Keywords: trolley, busbar, voltage losses, active losses, model, overhead crane, harmonics

REFERENCES

- [1] Zare F., Ledwich G. F. (2002). Reduced layer planar busbar for voltage source inverters. *IEEE Trans. Power Electron.*, 17, 4, 508–516 (in English).
- [2] Gaoyu, Z., Zhengming, Z., Liqiang, Y. (2013). Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter. *IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA, 1213-1218. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520453 (in English).
- [3] Kotsur, M., Yarymbash, D., Kotsur, I., Bezverkhnia Yu. (2018). Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors. *IEEE: 14-th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 304-307 DOI:10.1109/TCSET.2018.8336208 (in English).
- [4] Kotsur M.I., Andrienko P.D., Kotsur I. M., Bliznyakov O.V. (2017). Converter for frequency-current slip-power recovery scheme. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 49-54.
- [5] Bedkowski, M., Smolka, J., Banasiak, K., Bulinski, Z., Nowak, A. J., Tomanek, T., Wajda, A. (2014). Coupled numerical modelling of power loss generation in busbar system of low-voltage switchgear. *Int. J. Thermal Sci.*, 82, 122–129 (in English).
- [6] Plesca, A. (2012). Busbar heating during transient conditions. *Electric Power Syst. Res.*, 89, 31–37. DOI: 10.1109/T-AIEE.1915.4765211 (in English).
- [7] Fedorov, A.A. (1987). Reference book power engineering of industrial enterprises T. 1. Power supply. Under the general ed. Fedorov A.A. M.: Gosenergoizdat, 840. (in Russian).
- [8] Raputov, B. M. (1990). Electrical equipment for cranes of metallurgical enterprises, Metallurgy, Moscow, 272.
- [9] Roskopf, A., Bar, E., Joffe, C. (2014). Influence of linner skin- and proximity effects on conduction in litz wires. *IEEE Trans. Power Electron.*, 29, 10, 5454–5461, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2293847 (in English).
- [10] IEC (61000-3-12: 2004) *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ogranichenie garmonicheskikh sostsvlyaiushikh toka, sozdavaemykh tekhnicheskimi sredstvami potrebyaemymy tokom bolee 16A, no ne bolee 75A (v odnoy faze), podkluchaemykh k nizkovol'tnym sistemam electrosnabzheniya obshshego naznacheniya. Normy i metody ispytaniy.* (Electromagnetic compatibility of technical means. Limit of harmonic current components created by technical means with a current consumption of more than 16 A, but not more than 75 A (in one phase), connected to low-voltage general-purpose power systems. Norms and methods of testing). (in Russian).
- [11] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* IEEE standard. London, 1992, 519-1992 (in English).
- [12] Popa, I., Dolan, A.I. (2013). Numerical modeling of DC busbar contacts. *IEEE: 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012)*, 188 – 193. DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231869 (in English).
- [13] Bezverkhnia Yu. S., Kotsur M. I., Yarymbash D.S., Kotsur I. M., Yarymbash S.T., Kilimnik I.M. (2018). Analysis of the shop networks busbars parameters at higher harmonic current actions. *Electrical engineering and power engineering*, 4, 51-63. DOI :10.15588/1607-6761-2018-4-5.
- [14] Bezverkhnia, Y. S., Kotsur, M. I., Yarymbash, D. S., & Kotsur, I. M. (2021). Increasing the efficiency of determining the parameters of trolley busbars based on field simulation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, 2 (3), 38–43. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.05>
- [15] Kotsur M.I., Yarymbash D.S., Bezverkhnia Yu.S., Kotsur I.M. (2020). Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation, 2020 *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240811
- [16] Kotsur M., Yarymbash, D., Bezverkhnia, Y., & Divchuk, T. (2021). Features of field modeling of electromagnetic processes of trolley busbar. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 1, 46–60. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-5>
- [17] Kotsur M. I., Yarymbash D. S., Bezverkhnia Yu.S., Kotsur I.M. (2019). New approach for voltage drop estimation in the busbars of workshop networks at higher current harmonics influence. *Problemele energeticii regionale*, 1(39), 43-56. – Режим доступу: DOI: 10.5281/zenodo.2650419
- [18] Kotsur M. I., Yarymbash D. S., Bezverkhnia Yu.S., Kotsur I.M. (2021). Accuracy Improvement for the Determination of Parameters and Voltage Drops in Busbars, Considering the Networks Power Factor. *Problemele energeticii regionale*, 3(51), 37-52. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.04>
- [19] Kotsur M. I., Kotsur I.M., Bezverkhnia Yu. (2017). Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions. *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, November 15th - 17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 88-91. DOI:10.1109/MEES.2017.8248960
- [20] Kopylov I.P. (2001). *Mathematical modeling of electrical machines*, Higher School, Moscow, 327.
- [21] Chernykh, I. V. (2008). *Modeling of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*, DMK Press; SPb, 288.
- [22] German-Galkin, S. G. (2001). *Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0*, Corona print, St. Petersburg, 320.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ 4 - ПРИВОДНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ТРАНСПОРТНИМ ЗАСОБОМ

БРИЛИСТИЙ В.В. аспірант кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: 77vitya77@gmail.com

Мета роботи. Визначити для розробленої електромеханічної системи керування 4-приводного електричного транспортного засобу потужності приводів та коефіцієнти редукторів, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с.

Методи дослідження. Математичний аналіз та моделювання.

Отримані результати. Запропоноване рішення полягає у визначенні, для заданої динаміки транспортного засобу (розгін від 0 до 100 км/год за 5 с), шляхом математичного моделювання, значень потужностей приводів та коефіцієнтів редукторів, що сприяють підвищенню ККД електромеханічної системи. Умовою підвищення ККД є мінімізація витрат електричної енергії на розгін. Розроблена комп'ютерна модель електромеханічної системи керування 4 - приводного електричного транспортного засобу дозволяє провести дослідження щодо визначення електромеханічних параметрів системи керування, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с. Визначення споживаного приводом струму проводилось шляхом дослідження енергетичних характеристик приводів, які отримано на розробленому раніше лабораторному стенді. Знайдено коефіцієнти редукторів та потужність приводу, що забезпечує мінімальне споживання електричної енергії при розгоні 4-приводного електричного транспортного засобу. З отриманих даних видно, що для кожної досліджуваної потужності існують мінімуми на проміжку коефіцієнтів редукторів 1-3,4. Також у процесі дослідження виявлено, що серед досліджуваних потужностей 30-160 кВт існує привод, який витрачає меншу кількість енергії. Для досліджуваного електричного транспортного засобу – це чотири привода по 75 кВт з коефіцієнтом редуктора 3,3. Наявність мінімумів на проміжку коефіцієнтів редукторів і проміжку досліджуваних потужностей приводів, пояснюється мінливістю ККД двигуна в діапазонах навантаження, що варіюються від 0,3 до 2 разів та частот обертання валу двигуна 0-3000 об/хв, обумовлене різним ступенем впливу витрат, що виникають у динамічних режимах роботи приводу.

Наукова новизна. При дослідженні енергетичних характеристик на основі розробленої системи керування 4-приводним транспортним засобом знайдено електромеханічні параметри системи, що забезпечують мінімум споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с.

Практична цінність. Отримані в результаті дослідження електромеханічні параметри системи керування 4-х приводним електричним транспортним засобом дозволяють в межах однієї дослідної номінальної потужності двигуна отримати економію електричної енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с в 2-3%.

Ключові слова: система керування; електропривод; електромобіль; енергетична характеристика; електромеханічні параметри

І. ВСТУП

Сучасна тенденція на зниження шкідливих викидів від транспортних засобів, що працюють на двигунах внутрішнього згорання, що відображається на законодавчому рівні вже в багатьох країнах, сприяє підвищенню попиту на електричні транспортні засоби (ЕТЗ), тим самим збільшуючи та посилюючи конкуренцію у сфері електромобільної галузі.

Будь-який транспортний засіб повинен мати стійке керування, що впливає на безпеку водіння і бути енергоефективним, за що, власне, ведеться боротьба у сфері розробок систем керування транспортними засобами. Ці критерії стосуються і електричних транспортних засобів.

У роботі [1] обґрунтовано, з погляду сталого керування транспортним засобом, використання 4 - приводного компонування, з електромеханічною системою керування розподілом крутного моменту.

Для підвищення конкурентоспроможності на ринку ЕТЗ дана 4 - приводна електромеханічна система керування повинна мати енергоефективність.

Тому дослідження енергоефективності даного компонування, що дозволяє визначити параметри електромеханічної системи керування, які сприяють мінімізації витрат енергії в динамічних режимах їзди, є актуальним завданням.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Існують різні підходи щодо досягнення енергоефективності приводів електричних транспортних засобів. У статті [2] аналізуються технології, що сприяють енергозбереженню приводів електричних транспортних засобів. Автор зазначає неефективний метод збереження енергії шляхом встановлення батареї підвищеної ємності. Проводиться аналіз алгоритмів керування потоком потужності для електричних транспортних засобів [3]. У галузі синтезу систем керування приводами з погляду економії енергії виділяються роботи, що базуються на методиці Energy Macroscopic Representation (EMR). Автори робіт [4], [5] показують можливості декомпозиції автомобіля відповідно до фізичних законів та синтезу схеми керування на базі методики EMR. З її допомогою також досліджуються гібридні транспортні засоби [6]. Дана методика добре себе зарекомендувала при дослідженні електронних диференціалів електричних транспортних засобів з двопровідною силовою установкою [7], [8]. Проведено дослідження [9], в якому порівнюється дві конфігураційні системи: одномоторний і модульно-каскадна, що представляє собою пару двигунів однакової потужності, але з різною кількістю пар полюсів, на основі методики EMR. У результаті дослідження автор визначив переваги модульно-каскадної схеми керування. Автори [10] провели дослідження модульно-каскадної схеми керування на фізичному експерименті. У статті [11] представлені результати дослідження впливу геометричних властивостей ТЗ на його тягові та енергетичні показники. В результаті розроблений метод оцінки впливу конструкційних параметрів, пройшов експериментальну перевірку та визнаний адекватним. Схоже дослідження проведено [12] де класифікують фактори, що впливають на витрати електричної енергії ЕТЗ. Та в результаті зазначені рекомендації щодо енергоефективного керування ЕТЗ.

Представлені роботи стосуються визначення енергоефективних електромеханічних параметрів одноприводних (або двопровідних) компонувань, проте недостатня кількість розглядає 4-приводну систему, що і обумовлює актуальність дослідження.

III. МЕТА РОБОТИ

Визначити для розробленої електромеханічної системи керування 4-приводного ЕТЗ потужності приводів та коефіцієнти редукторів, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ЗДОБУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Вибір потужностей приводів електричних транспортних засобів часто ґрунтуються на тяговому розрахунку [13], що враховує в собі лише механічні параметри транспортного засобу. Аналогічним способом роблять вибір коефіцієнтів редукторів, що забезпечують досягнення максимальної швидкості (прискорення) транспортним засобом [14], [15]. Зазначений вибір потужності приводу та коефіцієнту редуктора призведе до зниження енергоефективності всієї електромеханічної системи.

Запропоноване рішення полягає у визначенні, для заданої динаміки транспортного засобу (розгін від 0 до 100 км/год за 5 с), шляхом математичного моделювання, значень потужностей приводів та коефіцієнтів редукторів, що сприяють підвищенню ККД електромеханічної системи. Умовою підвищення ККД є мінімізація витрат електричної енергії на розгін, згідно:

$$\eta_{сист} = \frac{E_{мех}}{E_{ел}} \cdot 100\%, \begin{cases} E_{мех} = const \\ E_{ел} \rightarrow min \end{cases}, \quad (1)$$

де $\eta_{сист}$ - ККД системи, %; $E_{мех}$ - повна механічна енергія розгону від 0 до 100 км/год за 5 с, кДж; $E_{ел}$ - витрати електричної енергії розгону від 0 до 100 км/год за 5 с, кДж.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система керування 4-х приводним електричним транспортним засобом. Комп'ютерна модель даної системи представлена на рисунку 1. Підсистема «SDA» визначає ступінь натискання на педаль акселератора (AP) для заданого розгону (100% до досягнення заданої швидкості).



Рисунок 1. Загальний вигляд комп'ютерної моделі дослідження енергетичних витрат 4-х приводного ЕТЗ

«TCS» - підсистема, що формує задані крутні моменти, на двигуни 4-приводного ЕТЗ, з урахуванням перерозподілу крутного моменту, що виключає пробуксовку, на підставі даних про геометрію ТЗ, положення центру мас, значення поточного прискорення. «VEHICLE» - підсистема, що описує зміну швидкості 4-приводного ЕТЗ з такими

характеристиками: маса $m = 1750$ кг; радіус колеса $R = 0,3$ м; максимальний крутний момент на колесах $M_{max} = 925$ Н·м. «DRIVE» – підсистема, що описує привод з точки зору механіки процесу розгону та розрахунку витрат електричної енергії. Структура підсистеми представлена рис. 2.

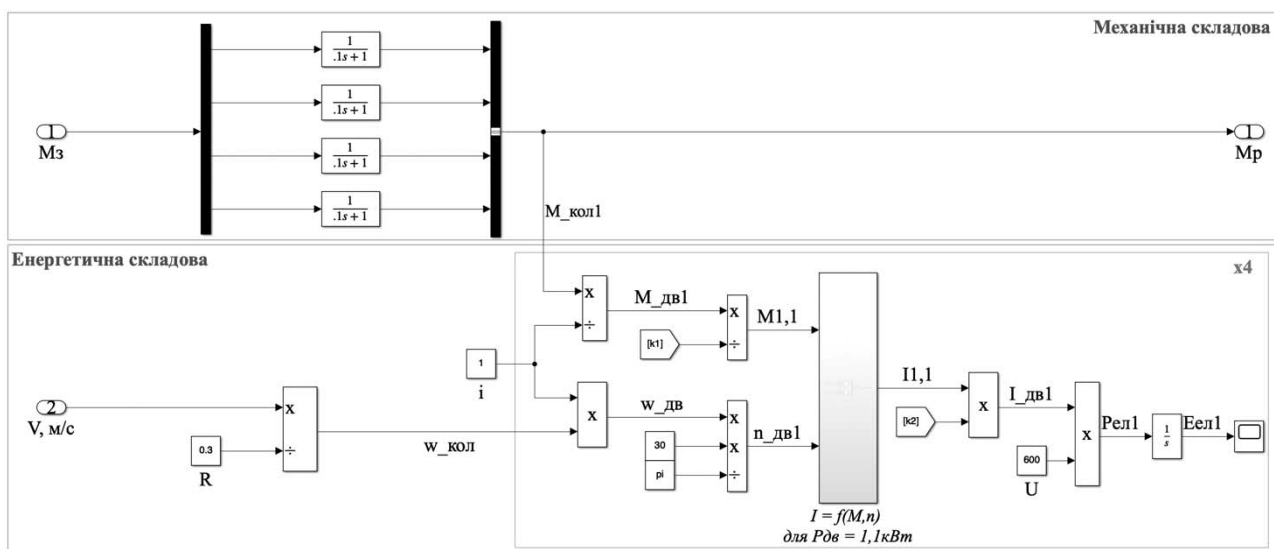


Рисунок 2. Загальний вид підсистеми «DRIVE», в якій енергетична складова представлена для одного з 4-х приводів.

Механічна частина підсистеми реалізована як аперіодична ланка з постійною часу 0,1 с. Таке уявлення моделює затримку відпрацювання впливу завдання на привод.

Енергетична складова визначає витрачену електричну енергію приводом кожного колеса за час розгону $t = 5$ с :

$$E_{елj} = \int_0^t U \cdot I_{ДВj}(t) \cdot dt, \quad (2)$$

де $E_{елj}$ - значення споживаної приводом j електричної енергії, кДж; t - час розгону ЕТЗ від 0 до

100 км/год, с; U - напруга живлення, В; $I_{ДВj}(t)$ – значення споживаного приводом j струму, А.

Сума витрат електричної енергії 4-х приводів, визначає витрати енергії електричним транспортним засобом, згідно:

$$E_{ел} = \sum_{j=1}^4 E_{елj}. \quad (3)$$



Рисунок 3. Фото стенду дослідження енергетичних властивостей приводів .

Визначення споживаного приводами струму проводилось шляхом дослідження енергетичних характеристик приводів, які отримано на розробленому раніше лабораторному стенді (рис 3) [16]. Дослідження проводилося шляхом варіювання моменту опору на валу досліджуваного двигуна за допомогою навантажувального. При цьому фіксувалися показання тензOMETричного датчика сили, що визначають момент опору на валу та показання амперметра на ланці постійного струму перетворювача частоти досліджуваного двигуна. В результаті отримана залежність споживання струму стендовим приводом від механічної потужності на валу двигуна згідно:

$$I_{1,1} = f(M_{1,1}, n_{1,1}), \quad (4)$$

де $I_{1,1}$ - значення споживаного струму приводом, А; $M_{1,1}$ – крутний момент на валу досліджуваного двигуна Н ·м; $n_{1,1}$ – частота обертання валу досліджуваного двигуна об/ хв.

Враховуючи, що дослідження енергетичної характеристики проведено для двигуна малої потужності (1,1 кВт) прийнято рішення про приведення отриманої характеристики до характеристики двигуна більшої потужності на підставі формул (5) - (8) та припущення про те, що втрати в АД пропорційно збільшуються із зростанням потужності:

$$M_{1,1j} = \frac{M_{ДВj}}{k_1}, \quad (5)$$

$$I_{ДВj} = I_{1,1j} \cdot k_2, \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{M_{номj}}{M_{ном1,1}}, \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{k_1}{\eta_{ДВj} / \eta_{1,1j}}, \quad (8)$$

де $M_{1,1j}$ - приведення значення заданого моменту на привід потужністю 1,1 кВт, Н·м; $M_{ДВj}$ - заданий момент на привід, Н·м; k_1 - коефіцієнт приведення заданого моменту досліджуваного приводу до стендового приводу, ум.од;

k_2 - коефіцієнт приведення споживаного струму стендового приводу до досліджуваного приводу, ум.од; $I_{1,1j}$ - струм споживання стендового приводу, А; $M_{номj}$ - номінальний момент досліджуваного двигуна, Н·м; $M_{ном1,1}$ - номінальний момент стендового двигуна, Н·м; $\eta_{ДВj}$ - ККД досліджуваного двигуна, ум.од; $\eta_{1,1j}$ - ККД стендового двигуна, ум.од.

Таким чином, механічна потужність на валу двигуна більшої потужності трансформується в механічну потужність стендового двигуна, як і споживання електричної енергії стендовим приводом перетворюються на витрати електричної енергії двигуном більшої потужності.

Таблиця 1. Таблиця параметрів досліджуваних двигунів.

Рдв, кВт	Мн, Н· м	КПД, %
30	196	84
37	241	84
45	293	84
55	355	84
75	485	84
90	582	84
110	711	84
132	849	85
160	1030	85

Отримана електромеханічна система керування 4-приводним електричним транспортним засобом вирішує завдання забезпечення заданої динаміки, виключаючи при цьому буксування (блок «TCS») і

виконує аналіз енергетичних витрат приводів (підсистема «DRIVE»).

Як досліджувані двигуни обрані двигуни сімейства Lego в діапазоні номінальних потужностей [30; 160] кВт. У таблиці 1 наведено параметри досліджуваних двигунів із числом пар полюсів2.

Зазначений діапазон потужностей дозволяє досліджувати двигун з різною перевантажувальною здатністю, в межах знятої експериментальної

характеристики реального приводу. Тобто двигуни меншої потужності використовуються для дослідження споживання енергії двигунів перевантажених щодо номінального моменту до 2 разів, а більшої потужності – недовантажених. У комп'ютерній моделі зміна потужності приводу відображається у зміні параметрів номінального моменту та ККД двигуна (7), (8).

Таблиця 2. Витрати електричної енергії 4-х приводним транспортним засобом в залежності від номінальної потужності двигуна та коефіцієнта редуктора.

P, кВт/і, ум.од.	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	3,3	3,4
30	1341,6	1338,8	1337,6	1338,2	1340,2	1343,2	1347,2	1351,6
37	1269,8	1266,4	1264,4	1263,8	1264,2	1265,8	1268,6	1272,2
45	1221,8	1218	1215,6	1214,2	1213,6	1214	1215,6	1218,6
55	1191,8	1188,4	1185,4	1183,2	1181,4	1180,8	1181,6	1184,2
75	1177,6	1174	1170,4	1167	1164	1162	1161,4	1163,6
90	1188,4	1184,8	1181	1176,6	1173	1170,2	1169,4	1171,4
110	1216,8	1213,4	1209,2	1204,4	1199,8	1196,4	1195,2	1197,4
132	1243	1239,6	1235,2	1230	1224,8	1220,8	1219,4	1221,8
160	1305,2	1302	1297,2	1291,4	1285,4	1281	1279,2	1282,2

Діапазон варіювання коефіцієнтів редукторів дорівнює [1]; [3], [4]. Граничне значення 3,4 обумовлено значенням максимальної швидкості транспортного засобу (100 км/год) із заданим радіусом колеса (R) та значенням обмеження максимальної частоти обертання валу двигуна (3000 об/хв). Проведено математичне моделювання розгону 4-приводного ЕТЗ від 0 до 100 км/год за 5 с. При цьому розгін здійснюється приводами однакової потужності та однаковими коефіцієнтами редукторів. По досягненню заданої швидкості фіксується кількість витраченої енергії приводом кожного з коліс, сума яких дає витрати електричної енергії всього транспортного засобу (3).

Так відбувається для кожного досліджуваного коефіцієнта редуктора. Після фіксації витрат електричної енергії в діапазоні досліджуваних коефіцієнтів редукторів змінюється потужність приводів, згідно з формулами масштабування (5) – (8) і виконуються аналогічні дії.

В результаті дослідження отримано значення сумарної витраченої енергії 4-приводним електричним транспортним засобом залежно від коефіцієнтів редукторів та потужності двигунів (таблиця 2).

Для фокусування уваги на отримані мінімуми представлені дані в діапазоні редукторів [2], [7]; [3], [4].

Даній таблиці відповідає тривимірний графік на рисунку 4. З отриманих даних видно, що при розгоні 4-приводного ЕТЗ від 0 до 100 км/год за 5 с, для кожної з досліджуваної потужності існують мінімуми на проміжку коефіцієнтів редукторів (1-3,4). Також у процесі дослідження виявлено, що серед досліджуваних потужностей (30-160) кВт існує привод, який витрачає меншу кількість енергії. Для досліджуваного ЕТЗ– це 4 привода по 75 кВт з коефіцієнтом редуктора 3,3.

V. ВИСНОВКИ

Розроблена комп'ютерна модель електромеханічної системи керування 4-приводного електричного транспортного засобу дозволяє провести дослідження щодо визначення електромеханічних параметрів системи керування, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с.

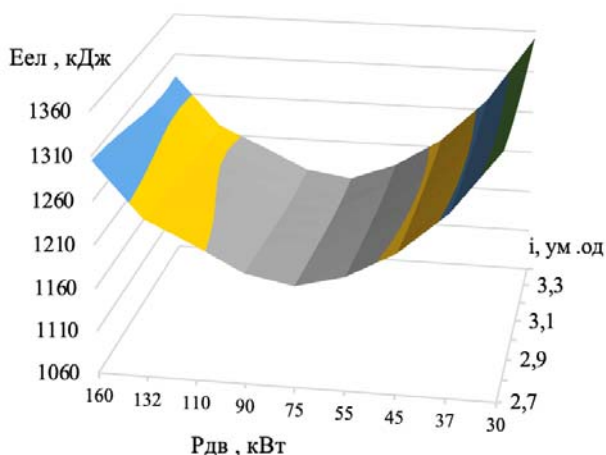


Рисунок 4. Графік споживання енергії транспортним засобом в залежності від номінальної потужності двигуна та коефіцієнтів редукторів

Наявність мінімумів на проміжку коефіцієнтів редукторів (1-3,4) і проміжку досліджуваних потужностей (30-160) кВт приводів, пояснюється мінливістю ККД двигуна в діапазонах навантаження, що варіюються (0,3 – 2) $M_{ном}$, та частот обертання валу двигуна (0-3000) об/хв, обумовлене різним ступенем впливу втрат, що виникають у динамічних режимах роботи приводу. Для 4-х приводного електричного транспортного засобу масою 1750 кг при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 секунд потужність двигуна, що забезпечує мінімальне споживання енергії, становить 75 кВт з коефіцієнтом редуктора 3,3.

Подальші кроки плануються у напрямку дослідження енергетичних витрат під час руху з постійними швидкостями, що дозволить провести пошук оптимального, з погляду витрат енергії, закону керування 4 - приводним електричним транспортним засобом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Nazarova, O. S. Research on the Influence of the Position of the Electric Vehicles Mass Center on Their Characteristics / O. S. Nazarova, V. V. Osadchyy, V. V. Brylystyj // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodynamics. Theory and Practice (PAEP), 2020. – pp. 1-4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240824.
- [2] Shabanov, A.V. Energy saving technologies and energy efficiency of motor transport power plants / A. V. Shabanov, V. K. Vanin, A. E. Yesakov // Izvestiya MGTU MAMI, 2021. – Vol. 15 – No. 4. –pp. 83-91. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-83-91
- [3] Kumar, L. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review / L. Kumar, S. Jain. //Renewable and Sustainable Energy Reviews29, 2014. – pp. 924-940. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.014.
- [4] Lhomme, W. Teaching electric vehicle drive control using Energetic Macroscopic Representation / W. Lhomme, A. Bouscayrol // 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013. – pp. 1-8. DOI: 10.1109/EVS.2013.6914831.
- [5] Depature, C. IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 / C. Depature, S. Jemei, L Boulon, A. Bouscayrol, N. Marx, S. Morando, A. Castaings// Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle," 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016. – pp. 1-6. DOI: 10.1109/VPPC.2016.7791701.
- [6] Lhomme, W. Simulation of a series hybrid electric vehicle based on energetic macroscopic representation / W. Lhomme, A. Bouscayrol and P. Barrade // 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2004. – Vol. 2 – pp. 1525-1530. DOI: 10.1109/ISIE.2004.1572040.
- [7] Draou, A.A Simplified Sliding Mode Controlled Electronic Differential for an Electric Vehicle with Two Independent Wheel Drives / A. Draou // Energy and Power Engineering, 2013. – Vol. 5 – pp. 416-421. DOI: 10.4236/epe.2013.56044.
- [8] Shchur, I. Modeling of two-motor front-wheel drive control for electric vehicle with electronic differential based on energetic macroscopic representation / I. Shchur, I. Havdo, Y. Biletskyi// Energy engineering and control systems, 6, 2020. – pp. 51-60. DOI: 10.23939/jeecs2020.01.051.
- [9] Shchur, I. Efficiency Evaluation of Single and Modular Cascade Machines Operation in Electric Vehicle / I. Shchur, L. Kasha, M. Bukavyn // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2020. – pp. 156-161. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235413.
- [10] Shouliang Han. The Modular Cascade Machines in electric vehicles / Shouliang Han, Shumei Cui, Xinxin Zhang, Hao Ge, Bingliang Xu // 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2012. – pp. 1-6. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422660.
- [11] Antoshchenkov, R. Determining The Influence of Geometric Parameters of The Traction-Transportation Vehicle's Frame on Its Tractive Capacity and Energy Indicators / R. Antoshchenkov, I. Galych, F. Nykyforov, H. Cherevatenko, I. Chyzhykov, S. Sushko, N. Ponomarenko, S. Diundik, I. Tsebriuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (7 (116)), 2022. – pp. 60–67. DOI:10.15587/1729-4061.2022.254688
- [12] Дембіцький, В.М. Дослідження енергетичних показників транспортних засобів з електричним приводом / В.М. Дембіцький // Науково-технічні дослідження у галузі транспорту: колективна монографія, 2022. –т. 1 – с. 77-114.
- [13] Салимоненко, Г. Н. Методика вибору тягового електродвигателя для електромобіля / Г. Н. Салимоненко, М. В. Назаров, А. В. Лопухов, А. А. Союстов // Інновації та інвестиції, 2017. – №11.
- [14] Наджафова, Г. А. Оптимальное передаточное число редуктора в быстродействующих следящих системах / Г. А. Наджафова // Авто-мат. и телемех., 1962. – т. 23– №3–с. 342-348.
- [15] Козлова, Т.А. Методика поиска рациональных конструктивных параметров тягового привода електромобіля / Т. А. Козлова // Интернет-журнал «Науковедение», 2016. – т. 8 – №5.
- [16] Osadchyy, V. Laboratory Stand for Research of Energy Characteristics of Electric Vehicle Drives / V. Osadchyy, O. Nazarova, V. Brylystyj // 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021. – pp. 1-4. DOI:10.1109/MEES52427.2021.9598661.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 4-Х ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

БРЫЛИСТЫЙ В.В. аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e - mail: 77vitya77@gmail.com;

Цель работы. Определить, для разработанной электромеханической системы управления 4-х приводного электрического транспортного средства, мощности приводов и коэффициенты редукторов, обеспечивающих минимальное потребление энергии при разгоне от 0 до 100 км/ч за 5 секунд.

Методы исследования. Математический анализ и моделирование.

Полученные результаты. Предложенное решение состоит в определении для заданной динамики транспортного средства (разгон от 0 до 100 км/ч за 5 с) путем математического моделирования, значений мощностей приводов и коэффициентов редукторов, способствующих повышению КПД электромеханической системы. Условием повышения КПД является минимизация расхода электрической энергии на разгон. Разработанная компьютерная модель электромеханической системы управления 4 - приводного электрического транспортного средства позволяет провести исследование определения электромеханических параметров системы управления, обеспечивающих минимальное потребление энергии при разгоне от 0 до 100 км/ч за 5 с. Определение потребляемого приводами тока проводилось путем исследования энергетических характеристик приводов, полученных на разработанном ранее лабораторном стенде. Обнаружены коэффициенты редукторов и мощность привода, обеспечивающая минимальное потребление электрической энергии при разгоне 4-приводного электрического транспортного средства. Из полученных данных видно, что для каждой изучаемой мощности существуют минимумы на промежутке коэффициентов редукторов 1-3,4. Также в процессе исследования обнаружено, что среди исследуемых мощностей 30-160 кВт существует привод, использующий меньшее количество энергии. Для исследуемого электрического транспортного средства это четыре привода по 75 кВт с коэффициентом редуктора 3,3. Наличие минимумов на промежутке коэффициентов редукторов и промежутке исследуемых мощностей приводов, объясняется изменчивостью КПД двигателя в диапазонах нагрузки, варьирующихся от 0,3 до 2 раз и частот вращения вала двигателя 0-3000 об/мин, обусловленное различной степенью воздействия потерь, в динамических режимах работы привода.

Научная новизна. Исследование энергетических характеристик на основе разработанной системы управления 4-х приводным транспортным средством позволяет найти электромеханические параметры системы, обеспечивающие минимум потребления энергии при разгоне от 0 до 100 км/ч за 5 с.

Практическая ценность. Полученные, в результате исследования, электромеханические параметры системы управления 4-х приводным электрическим транспортным средством позволяют в пределах одной мощности двигателя получить экономию электрической энергии на разгон от 0 до 100 км/ч за 5 с в 2-3%.

Ключевые слова: система управления; электропривод; автомобиль; энергетическая характеристика; электромеханические параметры.

INVESTIGATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMECHANICAL CONTROL SYSTEM OF 4-DRIVE ELECTRIC VEHICLE

BRYLYSTYI V.V. Ph.D. student of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e - mail : 77vitya77@gmail.com

Purpose. To determine for the developed electromechanical control system of a 4-drive electric vehicle, the power of the drives and the coefficients of the gearboxes that ensure the minimum energy consumption during acceleration from 0 to 100 km / h in 5 s.

Research methods. Mathematical analysis and modeling.

Findings. The proposed solution is to determine, for a given vehicle dynamics (acceleration from 0 to 100 km / h in 5 s), by mathematical modeling, values of drive powers and gear ratios, which increase the efficiency of the electromechanical system. The condition for increasing the efficiency is to minimize the consumption of electrical energy for acceleration. The developed computer model of the electromechanical control system of the 4 - drive electric vehicle allows to carry out researches on definition of electromechanical parameters of the control system providing the minimum energy consumption at dispersal from 0 to 100 km / h for 5 s. The current consumed by the drives was determined by studying the energy characteristics of the drives obtained on a previously developed laboratory stand. Gear ratios and drive power have been found to provide minimum power consumption when accelerating a 4-wheel drive electric vehicle. From the obtained data it is seen that for each power studied there are minima in the range of gear ratios 1-3,4. Also in the course of the research it was found that among the studied powers of 30-160 kW there is a drive that uses less energy. For the studied electric vehicle, these are four drives of 75 kW with a reduction factor of

3,3. The presence of minima in the interval between the gear ratios and the interval of the studied drive powers is explained by the variability of the engine efficiency in the load ranges varying from 0.3 to 2 times and the engine shaft speed of 0-3000 rpm, due to varying degrees of loss impact, the dynamic modes of the drive.

Originality. The study of energy characteristics based on the developed control system for a 4-wheel drive vehicle makes it possible to find the electromechanical parameters of the system that provide a minimum of energy consumption during acceleration from 0 to 100 km/h in 5 s.

Practical value. The electromechanical parameters of the control system of the 4-drive electric vehicle obtained as a result of research allow to receive economy of electric energy at dispersal from 0 to 100 km / h for 5 s in 2-3% within one experimental nominal power of the engine.

Keywords: control system; electric drive; electric car; energy characteristic; electromechanical parameters

REFERENCES

- [1] Nazarova, O.S., Osadchyy, V.V., Brylysty, V.V. (2020) Research on the Influence of the Position of the Electric Vehicles Mass Center on Their Characteristics. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), 2020, pp. 1-4, DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240824
- [2] Shabanov, A.V., Vanin, V.K., Yesakov, A.E. (2021) Energy saving technologies and energy efficiency of motor transport power plants. Izvestiya MG TU MAMI, 2021, vol. 15.No.4, pp. 83-91. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-83-91
- [3] Kumar, L., Shailendra, J. (2014). Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29, pp. 924-940. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.014
- [4] Depature, C., Lhomme, W., Bouscayrol, A. (2013). Teaching electric vehicle drive control using energetic macroscopic representation. 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). DOI: 10.1109/evs.2013.6914831
- [5] Depature, C., Jemei, S., Boulon, L., Bouscayrol, A., Marx, N., Morando, S., Castaigns, A. (2016). IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 - energy management of a fuel cell/battery vehicle. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). DOI: 10.1109/vppc.2016.7791701
- [6] Lhomme, W., Bouscayrol, A., Barrade, P. (2004). Simulation of a series hybrid electric vehicle based on energetic macroscopic representation. 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1525-1530. DOI: 10.1109/isie.2004.1572040
- [7] Draou, A. (2013). A simplified sliding mode controlled electronic differential for an electric vehicle with two independent wheel drives. Energy and Power Engineering, 05(06), pp. 416-421. DOI:10.4236/epe.2013.56044
- [8] Shchur, I., Havdo, I., Biletskyi, Y. (2020). Modeling of two-motor front-wheel drive control for electric vehicle with electronic differential based on energetic macroscopic representation. Energy Engineering and Control Systems, 6(1), pp. 51-60. DOI: 10.23939/jeecs2020.01.051
- [9] Shchur, I., Kasha, L., Bukavyn, M. (2020). Efficiency evaluation of single and Modular Cascade Machines operation in Electric Vehicle. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), pp. 156-161. DOI: 10.1109/tcset49122.2020.235413
- [10] Shouliang Han, Shumei Cui, Xinxin Zhang, Hao Ge, Bingliang Xu. (2012). The modular Cascade Machines in electric vehicles. 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-6. DOI: 10.1109/vppc.2012.6422660
- [11] Antoshchenkov, R., Halych, I., Nykyforov, A., Cherevatenko, H., Chyzhykov, I., Sushko, S., Ponomarenko, N., Diundik, S., Tsebruk, I. (2022). Determining the influence of geometric parameters of the traction-transportation vehicle's frame on its tractive capacity and energy indicators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(7) (116), pp. 60-67. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254688
- [12] Dembitskyi, V.M. (2022). Doslidzhennia enerhetychnykh pokaznykiv transportnykh zasobiv z elektrychny mpryvodom [Study of energy performance of electric vehicles]. Naukovotekhnichni doslidzhennia u haluzitransportu: kolektyvna monohrafiia, 2022, vol. 1, pp. 77-114. (in Ukrainian)
- [13] Salimonenko, G. N., Nazarov, M. V., Lopukhov, A. V., Soyustov A. A. (2017). Metodikavy boratyagovogoelektr odvigatelyadlyae lektromobilya [The method of choosing a traction motor for an electric vehicle]. Innovaciiinvesticii, 2017, No. 11. (in Russian)
- [14] Nadzhafova G. A. (1962). Optimal gear ratio in high-speed servo systems. Auto-mat and telemekh, 1962, vol. 23, No. 3, pp. 342-348. (in Russian)
- [15] Kozlova T.A. (2016). Metodika poiskaraci onal'nyhkons truktivnyh parametro vtyagovogoprivoda elektromobilya [Method of searching for rational design parameters of the traction drive of an electric vehicle]. Internet-zhurnal Naukovedenie, vol. 8, No. 5. (in Russian)
- Osadchyy, V., Nazarova, O., Brylysty, V. (2021). Laboratory stand for research of energy characteristics of electric vehicle drives. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), pp. 1-4. DOI: 10.1109/mees52427.2021.9598661

РОЗРАХУНОК СХЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ДЖЕРЕЛ

- ЗАЙЦЕВ Р.В.** д.т.н., с.н.с., завідувач кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: roman.zaitsev@khpri.edu.ua;
- КІРІЧЕНКО М.В.** к.т.н., с.н.с., доцент кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: mykhailo.kirichenko@khpri.edu.ua;
- МІНАКОВА К.О.** к.ф.-м.н., доц., доцент кафедри фізики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: kseniia.minakova@khpri.edu.ua;
- ТОМАШЕВСЬКИЙ Р.С.** д.т.н., проф., директор навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та електромеханіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: roman.tomashevskiy@khpri.edu.ua;
- НІКІТІН В.О.** науковий співробітник кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: bictop@ukr.net;
- ХАРЧЕНКО М.М.** науковий співробітник кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: hnm@ukr.net

Метароботи. Впровадження електронного навантаження для випробування високоточних низьковольтних джерел (сонячних батарей) вимагає ретельного перегляду не тільки схемотехнічної конструкції, а й теплотехнічної та механічної конструкції. У статті розглядається принцип створення та розрахунку оптимального рішення для реалізації електронного навантаження.

Методологія. Для досягнення мети використовуються методи аналізу сучасної електронної бази, розрахунки основних фізичних та електричних параметрів та їх моделювання.

Висновки. На основі розглянутих фізико-схемних рішень для реалізації електронного блоку навантаження була розроблена відповідна електрична схема. Транзистори керуються чотирма уніполярними операційними підсилювачами, інтегрованими в мікросхему LM324. Управління електронним блоком навантаження реалізується шляхом управління напругою на клеммах позитивного зворотного зв'язку, яка додатково стабілізується мікросхемою TL431. Пристрій живиться від джерела постійного стабілізованого струму напругою 12 В (забезпечує додаткову фільтрацію від коливань напруги).

Оригінальність. Сучасні досягнення у розробці сонячних елементів та інших низьковольтних джерел енергії призвели до необхідності створення компактних та експресних систем їх тестування, котрі не можна реалізувати на існуючих рішеннях.

Практичне значення. Дотримання показань і принципів, які викладені в цій статті, забезпечить навантаженню можливість працювати на великій потужності, і при цьому зберегти хороші характеристики і надійність. Розроблена схема дозволяє створити компаксний пристрій експресного тестування сонячних батарей.

Ключові слова: електронне навантаження; MOSFET; сонячні елементи; системи тестування; автоматизація.

I. ВСТУП

Впровадження електронного навантаження для випробування сильнострумних низьковольтних джерел (сонячних елементів) вимагає ретельного розгляду не тільки конструкції схеми, але також теплової та механічної конструкції [1]. Дотримання вказівок та принципів, викладених у цій статті, забезпечить навантаженню можливість працювати з великою потужністю, зберігаючи при цьому оптимальні характеристики та надійність.

нтаженню можливість працювати з великою потужністю, зберігаючи при цьому оптимальні характеристики та надійність.

II. АНАЛІЗ ЗАГАЛЬНИХ РІШЕНЬ ЕЛЕКТРОННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Електронні навантаження, котрі наявні на ринку, поєднують чудову точність зі складними інтерфейса-

ми управління і, як правило, здатні працювати з дуже високим струмом при великій потужності [1]. Зазвичай доступні різні моделі, кожна з яких відповідає різному діапазону напруги, потужності та струму (наприклад прилади Chroma, рис. 1) [2]. З рисунку видно, що найнижчий досяжний опір становить близько 5 мОм, а струм може сягати 80 А.

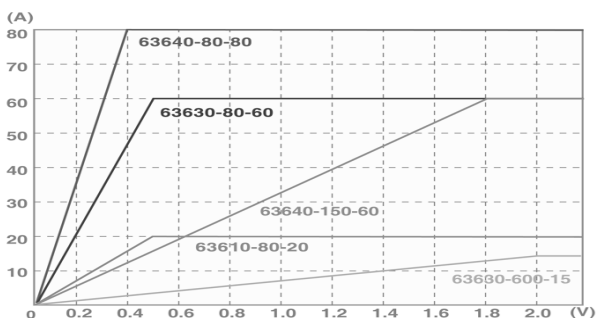


Рисунок 1. Характеристики напруги і струму навантажень серії Chroma 63600 [2]

Однак, незважаючи на ці технічні характеристики, загальна ефективність масиву навантажень принципово обмежена його електричним підключенням до випробовуваного джерела живлення. За вимогами для підключення використовуються мідні та алюмінієві провідники поперечним перерізом 40 см² або більше і ця довжина підключення накладає значні резистивні втрати між випробовуваним джерелом живлення та модулями навантаження. Цей додатковий опір впливає на напругу навантаження, а паразитна індуктивність L_p в провідниках обмежує максимальну швидкість перехідних процесів (dI/dt) [2]:

$$\frac{dI}{dt_{\max}} \leq \frac{V_d}{L_p} \quad (1)$$

Також, для тестування більш потужних джерел живлення, можна поєднувати паралельно кілька зазначених модулів навантаження (можна досягти ефективного опору нижче 2,7 мОм). Поряд із цим, чим більше індивідуальних навантажень, які поєднуються паралельно, тим більшою стає установка, і, відповідно, більше шин опору та індуктивних втрат на шині з'єднання. Очевидно, що для досягнення найвищої швидкості перехідних процесів та найнижчого загального опору потрібне більш спеціалізоване рішення електронного навантаження.

III. МЕТА РОБОТИ

Впровадження електронного навантаження для випробування високоточних низьковольтних джерел (сонячних батарей) вимагає ретельного перегляду не тільки схемотехнічної конструкції, а й теплотехнічної та механічної конструкції. У статті розглядається принцип створення та розрахунку оптимального рішення для реалізації електронного навантаження.

IV. СХЕМА РЕАЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Щоб імітувати поведінку напівпровідникового приладу [3], що живиться, нам потрібне електронне навантаження з наступними характеристиками:

- якомога більша швидкість наростання струму навантаження (dI/dt) (в кращому випадку швидкість наростання також регулюється);
- регульований струм навантаження;
- висока потужність розсіювання, як пікова, так і безперервна;
- можливість контролювати струм навантаження з високою точністю та широкою смугою пропускання.

Щоб перевірити джерела живлення низької напруги на дуже високих рівнях струму (наприклад, сонячні модулі), електронне навантаження повинно мати наднизький мінімальний опір. Нарешті, електронне навантаження повинно бути спроектоване для підключення до випробовуваного джерела з мінімальним опором та індуктивністю, інакше загальна ефективність буде обмежена самим з'єднанням.

Найпростішим навантаженням, яке можна запропонувати, є силовий резистор. Якщо його розмір та охолодження правильні, він може задовольнити вимогу до великої потужності, що розсіюється, а струм можна контролювати безпосередньо (вимірюючи напругу на відомому опорі). Послідовне додавання комутатора дає змогу генерувати перехідне навантаження. Однак навантаження буде або повністю ввімкнено, або повністю вимкнено, і сила струму буде залежати від напруги, що випробовується. Швидкість зміни струму не контролюється і не регулюється. Очевидно, що це не гнучке рішення, яке можна адаптувати до широкого кола вимог до тестування.

Для забезпечення змінного навантаження та регульованої швидкості зниження струму (швидкості, з якою струм навантаження зростає та падає), необхідно побудувати активну схему на основі операційного підсилювача. Топологія цієї схеми показана на рисунку 2. Операційний підсилювач приводить в дію затвор силового MOSFET транзистору для встановлення керуваної напруги на сенсорному резисторі [4]. Це призводить до контрольованого струму навантаження, який протікає від стоку до джерела MOSFET і через сенсорний резистор до землі. Потужність MOSFET додає посилення струму, але не додає посилення напруги, оскільки він працює як підсилювач струму (source-follower) [5].

Ця схема може бути реалізована з n-канальним MOSFET із сенсорним резистором на нижній стороні або з p-канальним MOSFET із сенсорним резистором на верхній стороні. У будь-якому випадку, сенсорний резистор додає негативного зворотного зв'язку, оскільки він підключений до джерела MOSFET, віднімаючи напругу від напруги затвору при збільшенні

струму, і навпаки, додаючи напругу затвора при зменшенні струму, що сприяє стабільності.

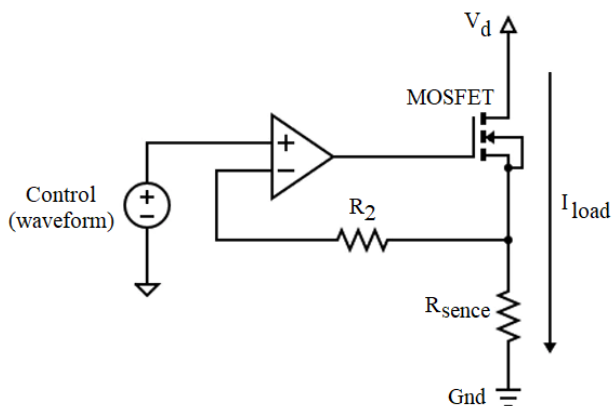


Рисунок 2. Базова схема керуваного електронного навантаження

Практична реалізація активної схеми електронного навантаження з n-канальним MOSFET показана на рисунку 3. Ця схема є поєднанням простого навантаження з рис. 2 і диференціального підсилювача. Ця топологія покращує точність, враховуючи динамічні та статичні різниці в потенціалі землі між вхідним сигналом (SGND) і нижньою стороною сенсорного резистора (GND).

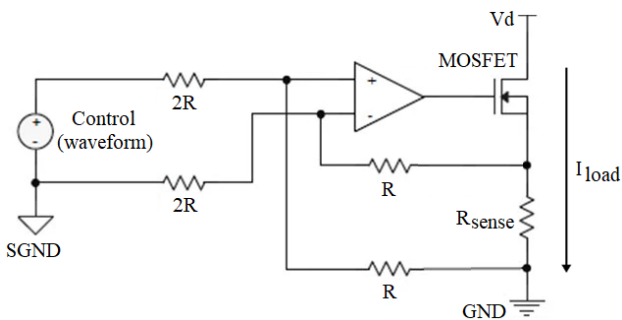


Рисунок 3. Деталізована схема електронного навантаження

Струм навантаження, за запропонованою схемою, пропорційний напрузі та формі керуючого сигналу, при цьому коефіцієнт підсилення встановлюється відношенням вхідних опорів та опорів зворотного зв'язку.

Активна схема електронного навантаження має багато переваг у порівнянні з простим комутованим опором. На відміну від простого опору, активний опір може генерувати змінний струм навантаження від нуля до максимального струму. Крім того, оскільки струм навантаження управляється операційним підсилювачем у замкнутому циклі, струм точно відстежує сигнал управління. Отже, активне електронне навантаження може дозволити контролювати швидкість зниження струму. Нарешті, оскільки в схемі є резистивний елемент із фіксованою величиною, точне

вимірювання струму навантаження високою смугою пропускання є відносно простим.

На рисунку 4 наведено один із варіантів додавання другого підсилювача для точного вимірювання струму навантаження. У цьому випадку він сконфігурований як підсилювач провідності, що дозволяє легко підсумовувати сигнали вимірювання струму з декількох схем електронного навантаження.

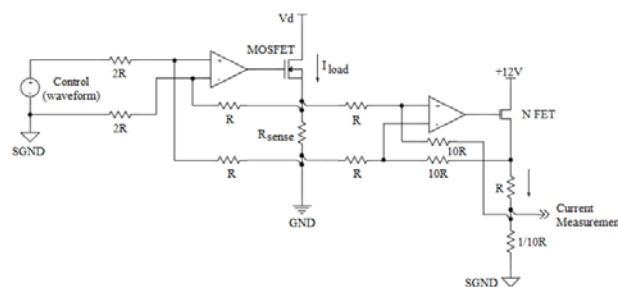


Рисунок 4. Вирім струму за рахунок додаткового підсилювача

V. ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ТА ЇХ РОЗРАХУНОК

Вибір MOSFET-транзистора. Силовий транзистор повинен бути обраний для забезпечення швидкої реакції, одночасно витримуючи велику потужність розсіювання. Необхідно враховувати кілька електричних та теплових характеристик:

Заряд затвору. Щоб модулювати струм, що протікає через MOSFET, з високою стабільністю та високою пропускну здатністю, операційний підсилювач повинен мати можливість швидко змінювати напругу від затвора до джерела. MOSFET з високою ємністю затвор-джерело та затвор-злив (C_{GS} та C_{GD} , відповідно) вимагатиме більшого струму керування для досягнення бажаної швидкості наростання. Тому важливо вибрати транзистор з низьким показником FOM та, відповідно, низькою паразитарною ємністю. Для багатьох MOSFET загальний заряд Q_G є хорошою метрикою, і порівняння між MOSFET може бути здійснено швидко, використовуючи лише цей параметр.

Напруга сток-джерело. Напруга сток-джерело (V_{DS}) повинна бути достатньо високою, щоб протистояти напрузі випробовуваного джерела живлення, включаючи будь-які перехідні стрибки або перевищення напруги. Більшість MOSFET -транзисторів розраховані на 12 В, 25 В, 30 В або навіть вище, тому вибір транзистора, придатного для тестування джерел низької та середньої напруги, не становить труднощів. Загалом, MOSFET слід вибирати з напругою V_{DS} , яка становить щонайменше 125% напруги, що вимірюється. Більш висока V_{DS} в транзисторі такого ж розміру негативно вплине на інші робочі характеристики, тому обирають пристрій з найнижчим допустимим значенням V_{DS} .

Струм стоку. Номінальний струм сток-джерело I_D повинен бути достатнім для передачі необхідного

струму навантаження. Якщо необхідно оперувати високими струмами, то можливе використання масиву паралельних схем навантаження, що полегшує розсіювання потужності та підвищує максимальний I_D . Іншими словами, якщо використовується масив із N рівних навантажень активного струму, струм через кожний MOSFET-транзистор є сумарним струмом навантаження, поділеним на N . При цьому один операційний підсилювач може управляти декількома MOSFET паралельно, за умови, що кожен MOSFET підключений до незалежного сенсорного резистора на вихідному терміналі. Ця схема гарантує, що загальний струм розподіляється рівномірно між MOSFET-транзисторами через описану раніше характеристику негативного зворотного зв'язку джерела-послідовника.

Під час керування двома або більше MOSFET-транзисторами, як правило, необхідно додавати невеликі опори послідовно з затворами MOSFET, щоб запобігти коливанню. Конфігурація операційного підсилювача додатково розширюється, включаючи підсумовування шляхом дублювання зворотного зв'язку та опорів вхідного дільника в кожний вхід схеми.

Теплова потужність навантаження. Найважливішою характеристикою MOSFET, що використовується в електронному навантаженні, є його здатність розсіювати відпрацьоване тепло. Загальна потужність навантаження (P_L), очевидно, є добутком струму навантаження та випробовуваної напруги:

$$P_L = I_{load} \cdot V_d$$

Якщо паралельно працюють кілька ланцюгів навантаження, кожен ланцюг проводить струм I_{load}/N , і загальна потужність навантаження розподіляється більш-менш рівномірно між транзисторами.

Частина цієї потужності розсіюється в на сенсорних резисторах (P_R) і ця частина змінюється як квадрат струму навантаження:

$$P_R = (I_{load} / N)^2 \cdot R_{sense}$$

Залишок потужності розсіюється в MOSFET-транзисторі (P_M):

$$P_L = (P_M + P_R) \cdot N$$

$$P_M = P_L / N - P_R$$

$$P_M = (I_{load} \cdot V_d) / N - (I_{load} / N)^2 \cdot R_{sense}$$

Здатність MOSFET розсіювати тепло узагальнюється двома ключовими параметрами: тепловим опором переходу до корпусу Θ_{JC} та стаціонарним розсіюванням потужності P_D . З цих двох значення Θ_{JC} є найбільш корисним, оскільки воно вказує на найнижче можливе підвищення температури переходу MOSFET як функцію потужності, виключаючи всі впливи зовнішнього середовища [6, 7].

Хоча характеристики MOSFET, надані виробни-

ком, також надають значення теплового опору до навколишнього середовища Θ_{CA} , це значення визначається стандартним розміром друкованої плати та конструкцією. Електронне навантаження великої потужності зазвичай проектується для максимального розсіювання тепла зі значно нижчим тепловим опором ніж типові значення теплового опору Θ_{JA} у вільному повітрі, що містяться в характеристиках MOSFET, наданих виробником. Іншими словами, оскільки для електронного навантаження великої потужності потрібен радіатор, який значно відрізняється від стандартної тестової плати Θ_{JA} , значення Θ_{JC} є найбільш корисним.

На додаток до характеристик термічного опору корпусу транзистора також слід враховувати максимальну температуру р-переходу кремнію T_{Jmax} . Більшість потужних транзисторів MOSFET розраховані на T_{Jmax} від 150 °C до 175 °C [8]. Електронне навантаження повинно бути спроектоване таким чином, щоб добуток потужності MOSFET P_M та теплового опору корпусу транзистора в поєднанні з максимальною температурою корпусу T_{MB} не перевищував T_{Jmax} :

$$P_M = (T_{Jmax} - T_{MB}) / \Theta_{JC}$$

Залежно від вибору параметрів, це співвідношення дає або максимально допустиму стабільну потужність для MOSFET, або максимально допустиму температуру радіатора при бажаній максимальній потужності.

Безпечний діапазон робочих параметрів MOSFET. Таблиця потужності MOSFET зазвичай включає графік безпечної робочої зони (safe-operating-area) (SOA). Цей графік показує постійну імпульсну потужність MOSFET. Графік SOA, наприклад, для PSM2R0 показаний на рисунку 5.

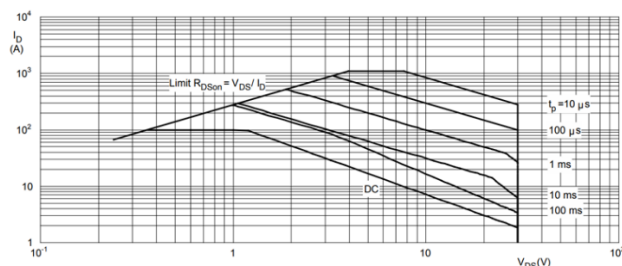


Рисунок 5. Графік безпечної робочої зони для MOSFET-транзистора PSMN2R0, TC = 25 °C

Графік SOA формується для фіксованої температури, додаткові криві показують зростання пікової потужності для більш короткої тривалості імпульсів [9]. Варто зазначити, що криві на графіку SOA, як правило, є лініями постійної потужності (постійний добуток $I_{DS} \times V_{DS}$). Здатність MOSFET обробляти набагато більшу потужність при коротких імпульсах дуже корисна для електронного навантаження, яке призначене для перевірки перехідних процесів.

Важливо розробити електронне навантаження

таким чином, щоб MOSFET не працював вище своєї кривої SOA для будь-якої передбачуваної ширини імпульсу. Робочі точки повинні бути розташовані на ділянці SOA, щоб забезпечити безпечну роботу конструкції. Деякі транзистори MOSFET оптимізовані для роботи в лінійній області і спеціально розроблені для того, щоб мати більшу площу під кривою SOA, також є MOSFET, оптимізовані для режимів швидкого включення.

Перехідний тепловий опір. Параметри MOSFET також включають графік перехідного теплового імпедансу, характерний графік, наприклад для PSMN2R0, показаний на рисунку 6. Імпульсний перехідний тепловий імпеданс MOSFET значно нижче, ніж стаціонарний тепловий імпеданс через теплоємність корпусу пристрою, свинцеву основу та матеріали корпусу.

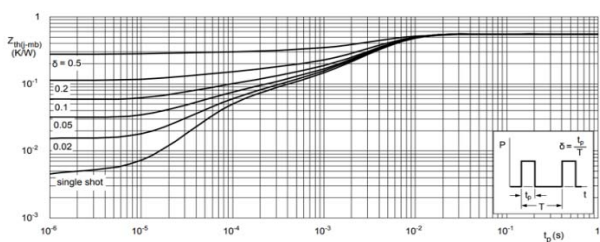


Рисунок 6. Діаграма перехідного теплового опору для силового MOSFET PSMN2R0.

На відміну від графіку SOA, графік перехідного теплового імпедансу не є функцією певного значення T_{MB} . Це робить його дуже корисним для визначення підвищення температури переходу MOSFET вище T_{MB} для будь-якої заданої ширини імпульсу струму та робочого циклу. Коли робочий цикл наближається до 100%, а ширина імпульсу наближається до постійного струму, графік перехідного теплового імпедансу збігається зі значенням стаціонарного стану теплового імпедансу переходу до корпусу Θ_{JC} . Наприклад, використовуючи рисунок 4, можна бачити, що MOSFET пропустить імпульс потужністю 200 Вт, який триває не більше 100 мкс при тривалості робочого циклу 10% (іншими словами, імпульс 100 мкс, що повторюється на частоті 1 кГц), ефективний тепловий імпеданс при такому перехідному процесі становить лише $0,075 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$, в порівнянні зі стійким значенням $\Theta_{JC} = 0,45 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Добуток цього перехідного теплового імпедансу та величини імпульсу 200 Вт дає прогнозований приріст T_j приблизно на $200 \text{ Вт} \times 0,075 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вибір сенсорного резистора. Тепловідвід. Як і силовий MOSFET, сенсорний резистор в активній схемі електронного навантаження також розсіює значну частку загальної потужності навантаження. Важливо вибрати чутливий резистор, який може не тільки проводити струм навантаження кожної паралельної гілки, але й швидко передавати відпрацьоване тепло до друкованої плати та радіатора.

Такий резистор повинен мати такі механічні ха-

рактеристики:

- велика площа контакту з друкованою платою для тепловідведення;
- корпус з низьким тепловим опором, який можна поєднати з охолодженням (радіатором);
- резистивний елемент та матеріали корпусу, які витримують високі робочі температури.

Перша характеристика надає перевагу компонентам для поверхневого монтажу, оскільки провідники резисторів електрично з'єднуються з друкованою платою лише на двох наскрізних отворах. Провідники також мають значний резистивний та індуктивний опір для струму навантаження. Також більшість корпусів є складними для термічного з'єднання з друкованою платою та радіатором для ефективного охолодження. SMD резистори мають дві ключові переваги: вони припаяні до широких накладок на друкованій платі і зазвичай мають тонкий плоский корпус, що дозволяє легко встановити ефективний тепловий зв'язок з радіатором.

Матеріали корпусу також важливі для теплових характеристик. Резистор, виготовлений у пластику, має перевагу в тому, що він електрично ізолюваний від радіатора. Однак інкапсуляція, як правило, має більш високий тепловий опір, ніж сам елемент, тому некапсульовані пристрої можуть досягти нижчого загального теплового опору.

Низька паразитна індуктивність. Паразитна індуктивність в сенсорному елементі безпосередньо обмежує максимальну швидкість наростання струму, яку можна досягти при електронному навантаженні (1), оскільки струм не може зростати швидше, ніж дозволяє індуктивність [10]. Крім того, при великих швидкостях зростання струму паразитна індуктивність знижує напругу на сенсорному елементі, що призводить до відхилення від дійсного струму навантаження. Натомість перехідна напруга на резисторі є сумою резистивної напруги та індуктивної напруги:

$$I_{sense} = (V_{sense} / R_{sense}) \cdot (1 - e^{-\tau/t})$$

$$V_{sense} = (I_{sense} \cdot R_{sense}) / (1 - e^{-\tau/t})$$

$$\tau = L_{sense} / R_{sense}$$

Схема підсилювача електронного навантаження не може відрізнити індуктивну частину сигналу від резистивної частини, тому фактичний струм навантаження зростає повільніше, ніж сигнал напруги на сенсорному резисторі (рис. 7).

На рисунку 7 ідеальний струм - це напруга на сенсорному резисторі, яка регулюється до постійного значення операційним підсилювачем у схемі навантаження, реагуючи на крок вхідної керуючої напруги. Реальний струм відстає від напруги сенсорного резистора з постійною часу $\tau \approx 200 \text{ нс}$. Фактичний струм узгоджується з керуючим сигналом лише після того,

як пройде приблизно $5 \times \tau = 1$ мкс, що робить схему неефективною для генерації швидких перехідних процесів навантаження.

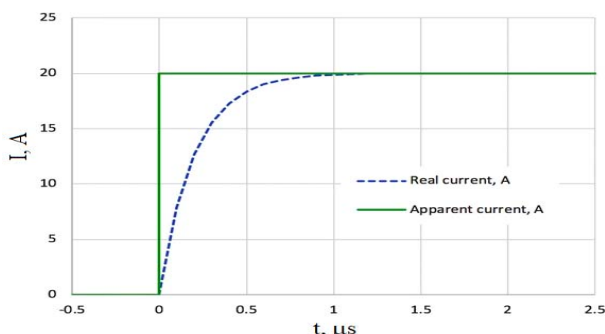


Рисунок 7. Перехідна характеристика резистора (5 мОм з індуктивністю 1 нГн)

Це відставання представляє проблему як для електронного навантаження, так і для ланцюгів вимірювання струму - обидва повинні бути компенсовані на величину цієї постійної часу. Індуктивний сигнал можна нівелювати, застосувавши до сигналу однополюсний фільтр низьких частот. Фільтр може бути реалізовано як RC-фільтр на сенсорному резисторі. Фільтр слід вибирати таким чином, щоб постійна часу відповідала сенсорному резистору:

$$\tau = R_{filter} \cdot C_{filter} = L_{sense} / R_{sense}$$

Якщо фільтр додається через сенсорний резистор, потрібно врахувати, щоб коефіцієнт постійного струму операційного підсилювача не змінювався.

Щоб полегшити проблему до її виникнення, обирають чутливий резистор з низькою індуктивністю. Короткий, широкий і тонкий резистивний елемент матиме нижчу індуктивність, ніж довгий і тонкий або спіральний.

Точність сенсорного резистора. Хоча це не є критичним для випробувань перехідних процесів навантаження, абсолютна точність електронного навантаження надзвичайно важлива, якщо виміряний струм буде використовуватися для розрахунку ефективності джерела живлення, що тестується [11]. Електронне навантаження ніколи не може бути точнішим, ніж сам сенсорний резистор, тому важливо вибрати сенсорний резистор з високою точністю.

Оскільки сенсорний резистор також буде розсіювати потужність, температурний коефіцієнт опору (TCR) відіграє значну роль у точності навантаження в широкому діапазоні потужності. У міру нагрівання резистора його опір R_T також збільшується, як правило, прямопропорційно температурі T :

$$R_T = R_{nom} \cdot (1 + (T - 25^\circ C) \cdot TCR)$$

Багато промислових сенсорних резисторів мають значення TCR на рівні 50 ppm/°C або нижче. Це еквівалентно зміні опору всього на 0,5% при підвищенні

температури на 100 °C [12]. Якщо потрібна більша точність, до електронного навантаження можна додати схему вимірювання температури. Потім поточні вимірювання можуть бути скориговані після збору даних на основі значення TCR та температури елемента на момент вимірювання.

Сенсорний резистор з окремим спеціальним підключенням живлення та сенсора також допомагає підвищити точність. Розділення з'єднання на ланцюг сильного струму та ланцюг низького струму дозволяє виключити додаток до струму за рахунок вимірювального кола. Таке з'єднання зазвичай називають з'єднанням Кельвіна, або чотиризондовим з'єднанням. Багато сенсорних резисторів виготовлено таким чином, особливо коли резистор розрахований на високий струм і низький опір.

Максимальний струм. Максимальна сила струму електронного навантаження - це проста функція напруги випробовуваного джерела живлення та комбінованого опору всіх MOSFET та сенсорних резисторів, при цьому MOSFET повністю відкриті. Щоб запобігти насиченню підсилювача при найвищому струмі навантаження, конструкція повинна мати загальний послідовний опір, який істотно нижче досліджуваної напруги розділеної на максимальний струм:

$$R_{load,min} = (R_{DS} + R_{sense}) / N$$

$$R_{load,min} = V_{d,min} / I_{load,max}$$

Це дозволяє операційному підсилювачу утримувати MOSFET в лінійній області на максимально керуваному струмі. Якщо струм піднімається вище значення $I_{load,max}$, ланцюг навантаження входить в насичення, повністю відкриваючи MOSFET, але більше не може підтримувати контроль струму навантаження.

Конструкція корпусу. Оскільки активна схема управляє струмом навантаження, утримуючи MOSFET в області насичення [13], MOSFET розсіює більшу частину потужності в електронному навантаженні. Сенсорний резистор також розсіює потужність, пропорційну квадрату струму навантаження. Оскільки резистор і MOSFET розсіюють значну потужність при навантаженні, їх слід вибирати ретельно. Теплова конструкція дуже важлива, це дозволить уникнути пошкоджень, спричинених надмірним нагріванням.

Рівномірний розподіл повної потужності. Якщо і MOSFET, і сенсорні резистори мають однакову потужність, конструкцію електронного навантаження можна приблизно оптимізувати, розподіливши потужність між транзистором і сенсорним елементом при максимальному струмі. Це досягається встановленням значення чутливого резистора приблизно рівним R_{DS} відкритого MOSFET. Цей метод також мінімізує пікову потужність як в сенсорних резисторах, так і в MOSFET, однак зобов'язує реалізувати охолодження сенсорних резисторів.

Графік на рисунку 8 показує, як розсіюється по-

тужність в MOSFET і сенсорних резисторах залежно від навантаження. Якщо транзистори або сенсорні резистори є обмежувальним фактором для загальної розсіювання потужності, баланс опору $R_{load,min}$ може бути зміщений, щоб зменшити потужність в транзисторі або сенсорному резисторі, за рахунок вищої пікової потужності у протилежному компоненті.

Використовуючи цю схему при рівнях струму нижче максимального, MOSFET завжди розсіює більше потужності, ніж сенсорний резистор, оскільки більша частина падіння напруги відбувається на MOSFET. Баланс розсіювання потужності також сильно варіюється залежно від напруги випробовуваного джерела живлення.

Вибір операційних підсилювачів. Операційний підсилювач повинен мати достатню вихідну потужність керувати затвором MOSFET, який представляє собою ємнісне навантаження на операційний підсилювач. Сила струму керування та швидкість зниження напруги також є важливими параметрами при виборі операційного підсилювача, особливо коли потрібна велика швидкість зниження струму навантаження.

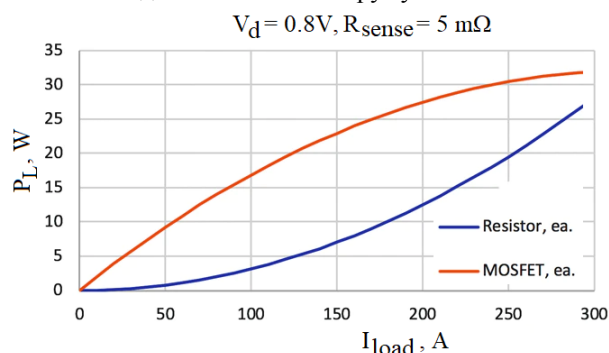


Рисунок 8. Потужності, що виділяються у MOSFET та сенсорному резисторі, в залежності від струму навантаження

Однополярне живлення. Оскільки електронне навантаження повинно мати лінійну реакцію від нульового до повного навантаження, достатньо однополярного живлення. Двополярне живлення не є необхідним, оскільки MOSFET перестає проводити струм, коли вихідна напруга підсилювача менше, ніж порогова напруга затвора V_{GS} . Однак операційний підсилювач та його живлення повинні бути вибрані таким чином, щоб напруга на затворі MOSFET була достатньо високою для досягнення максимально бажаного струму навантаження. Це означає, що вихідна напруга операційного підсилювача повинна перевищувати $I_{load,max} \cdot R_{sense} + V_{GS}$. Цей критерій суттєво звужує діапазон операційних підсилювачів, оскільки багато пристроїв з однополярним живленням обмежені напругою +5 В. Доступно значно менше операційних підсилювачів, які мають напругу живлення +12 В або вище.

Точність підсилювача. Точний операційний під-

силювач забезпечує кращу точність встановлення струму навантаження в залежності від вхідного контрольованого сигналу. Це робить навантаження простішим у використанні та стабільнішим. Низькі вхідні напруги зміщення можуть зменшити або усунути зміщення струму навантаження, особливо коли сигнал управління дорівнює 0 В. Низькі вхідні струми зміщення дозволяють використовувати більший опір вхідного сигналу та зворотного зв'язку в схемі диференціального підсилювача, що, в свою чергу, покращує вхідний опір.

Вимірювання струму. На додаток до забезпечення швидкого та точного значення струму навантаження, схема також має включати засоби контролю струму навантаження. Зазвичай це вихідний сигнал, який можна підключити до входу вимірювального пристрою (рис. 4), щоб забезпечити графічну індикацію форми струму навантаження в режимі реального часу. Якщо для вимірювання струму навантаження використовується окремий підсилювач, його точність може зменшити або усунути потребу в калібруванні. Це особливо корисно для навантажень з дуже сильним струмом, у цьому випадку може бути неможливо знайти прецизійний шунт, утруднюючи або унеможливаючи калібрування за зовнішнім еталоном. Найпростішою схемою контролю струму є підсумовуючий підсилювач, що генерує вихідну напругу, пропорційну струму навантаження [14], [15].

Одним із можливих вдосконалень є перетворення вихідного сигналу підсилювача в джерело струму (рис. 4). Це забезпечує вихідний струм, пропорційний струму навантаження. Такий підхід має деякі переваги перед сигналом напруги. Окремі виходи джерела струму можна легко підсумувати, подаючи їх на єдиний резистор, що дозволяє кільком пристроям навантаження повідомляти про загальний струм навантаження без необхідності додаткового підсумовуючого підсилювача. Виходи джерела струму також менш чутливі до шуму, спричиненого зсувами потенціалу землі між пристроєм навантаження та вимірювальним обладнанням, особливо якщо підсумовуючий резистор розташований на вимірювальному обладнанні.

Схема вимірювання струму або моніторингу може бути оптимізована для точності або для швидкості та пропускну здатності. Перше має важливе значення, якщо електронне навантаження буде використовуватися для вимірювання ефективності, де постійний струм навантаження повинен бути точно відомий. Останнє є важливим для аналізу перехідної реакції, де форма сигналу струму навантаження є критичною для точного представлення швидкості наростання струму навантаження. У багатьох випадках можна досягти хорошого компромісу між швидкістю та точністю. Підсилювачі з більш високою точністю зазвичай підтримують меншу смугу пропускання, тоді як більш швидкі підсилювачі, як правило, мають більш високі вхідні напруги зміщення та струми зміщення.

Схемо-технічне рішення блоку електронного на-

вантаження. На основі розглянутих фізичних та схемних рішень щодо реалізації блоку електронного навантаження було розроблено електричну схему, наведену на рисунку 9. Розроблений блок запропоновано реалізувати на основі чотирьох паралельних ланцюгів, які реалізовано на основі MOSFET-транзисторів STP75N75F4 (максимальний струм навантаження до 80 А кожний) [16]. Зазначені транзистори керуються через чотири однополярні операційні підсилювачі, об'єднані в мікросхемі LM324. Керування блоком електронного навантаження реалізовано за рахунок керування напругою на виводах позитивного зворотного зв'язку, котра додатково стабілізована мікросхемою TL431 [17]. Живиться блок від джерела постійного стабілізованого струму з напругою 12 В (передбачена додаткова фільтрація від коливань напруги).

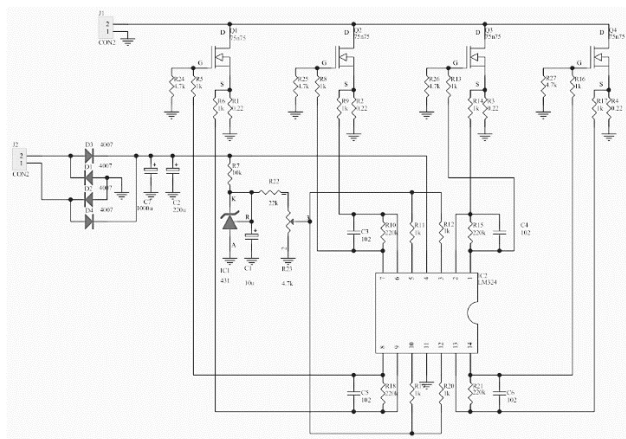


Рисунок 9. Електрична схема блоку електронного навантаження

VI. ВИСНОВКИ

На основі розглянутих фізико-схемних рішень для реалізації електронного блоку навантаження була розроблена електрична схема, показана на рисунку 9. Транзистори керуються чотирма уніполярними операційними підсилювачами, інтегрованими в мікросхему LM324. Управління електронним блоком навантаження реалізується шляхом управління напругою на клеммах позитивного зворотного зв'язку, яка додатково стабілізується мікросхемою TL431. Пристрій живиться від джерела постійного стабілізованого струму напругою 12 В (забезпечує додаткову фільтрацію від коливань напруги).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Mazumder G.C. Development of a computerized I-V-tracing system for solar PV module testing / G.C. Mazumder, P.R. Biswas, N. Shams, et. al. // International Journal of Scientific & Technology Research, 2016. – Vol. 5. – No. 6. – P. 328-333. 10.11591/ijece.v1i1i3.pp2011-2018.
- [2] Beye M.L. Active Gate Driver and Management of the Switching Speed of GaN Transistors during Turn-On and Turn-Off / M.L. Beye, T. Wickramasinghe, J.F. Mognotte, et. al. // Electronics, 2018. – Vol. 10. – No. 2. – P. 106-119. 10.3390/electronics10020106.
- [3] Nel G. Development of an Intelligent Electronic Load Controller for Stand-Alone Micro-Hydropower Systems / G. Nel, W. Doorsamy // IEEE PES/IAS PowerAfrica, 2018, 18202117. 10.1109/PowerAfrica.2018.8521133.
- [4] Ichino S. Analysis of Random Telegraph Noise Behaviors toward Changes of Source Follower Transistor Operation Conditions using High Accuracy Array Test Circuit / S. Ichino, T. Mawaki, A. Teramoto, et. al. // IEICE Tech. Rep., 2017. – Vol. 117. – No. 260. – P. 57-62.
- [5] Zaitsev R.V. Development of hybrid solar generating module for high-efficiency solar energy station / R.V. Zaitsev, M.V. Kirichenko, G.S. Khrypunov, et. al. // First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, 2017. – P. 360-364. 10.1109/UKRCON.2017.8100510.
- [6] Scherback Ya.V. Control characteristics of active four-quadrant converter in rectifier and recovery mode / Ya.V. Scherback, O.A. Plakhtiy, V.P. Nerubatskiy // Technical Electrodynamics, 2017. – No. 6. – P. 26-31. 10.15407/techned2017.06.026.
- [7] Tsibizov A. Accurate Temperature Estimation of SiC Power Mosfets Under Extreme Operating Conditions / A. Tsibizov, I. Kovačević-Badstübner, B. Kakarla, et. al. // IEEE Transactions on Power Electronics, 2020. – Vol. 35. – No. 2. – P. 1855-1865. 1865. 10.1109/TPEL.2019.2917221.
- [8] Eremenko V.V. Electron and phonon states localized near the graphene boundary / V.V. Eremenko, V.A. Sirenko, I.A. Gospodarev, et. al. // Low Temp. Phys., 2017. – Vol. 43. – No. 11. – P. 1323-1331. 10.1063/1.5010320.
- [9] Zaitsev R.V. Single-crystal silicon solar cell efficiency increase in magnetic field / R.V. Zaitsev, V.R. Kopach, M.V. Kirichenko, et. al. // Functional Materials, 2010. – Vol. 17. – No. 4. – P. 554-557.
- [10] Eremenko V.V. Electron spectra of graphene with local and extended defects / V.V. Eremenko, V.A. Sirenko, I.A. Gospodarev, et. al. // Journal of Physics: Conference Series, 2018. – Vol. 969. – No. 1. – P. 012021. 10.1088/1742-6596/969/1/012021.
- [11] Kirichenko M.V. Adopting of DC magnetron sputtering method for preparing semiconductor films / M.V. Kirichenko, R.V. Zaitsev, A.I. Dobrozhan, et. al. // 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, 2017. – P. 108-111.
- [12] Khrypunov G.S. Flexible solar cells are based on underlying layers of CdTe obtained by magnetron sputtering / G.S. Khrypunov, G.I. Kopach, R.V. Zaitsev, et. al. // Journal of Nano- and Electronic Physics, 2017. – Vol. 9. – No. 2. – P. 02008-1-02008-5. 10.21272/jnep.9(2).02008.

- [13] Taur Y. Modeling of DG MOSFET I – V Characteristics in the Saturation Region / Y. Taur, H.-H. Lin // IEEE Transactions on Electron Devices, 2018. – Vol. 65. – No. 5. – P. 1714-1720. 10.1109/TED.2018.2818943.
- [14] Bin Mohd Yusof M.A. A Study on Loop Gain Measurement Method Using Output Impedances in Operational Amplifier / M.A. Bin Mohd Yusof, N. Tsukiji, Y. Kobori, et. al. // J. Tech. Soc. Sci., 2018. – Vol. 2. – No. 3. – P. 19-28. 10.1587/transcom.2017EBP3358.
- [15] Altun M. Design of a fully differential current mode operational amplifier with improved input–output impedances and its filter applications / M. Altun, H. Kuntman // International Journal of Electronics and Communications, 2008. – Vol. 62. – No. 3. – P. 239-244. 10.1016/j.aee.2007.03.020.
- [16] Khera N. Prognostics of Power MOSFET due to unclamped inductive switching / N. Khera, S. Tiwari // 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, 2016. – P. 16672709. 10.1109/ICPEICES.2016.7853316.
- [17] Irving B.T. Small-signal model of variable-frequency flyback converter / B.T. Irving, Y. Panov, M.M. Jovanovic // Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. – P. 7845817. 10.1109/APEC.2003.1179335.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2022

РАСЧЕТ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

ЗАЙЦЕВ Р.В.

д.т.н., с.н.с., заведующий кафедры микро- и наноэлектроники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: roman.zaitsev@khpі.edu.ua;

КИРИЧЕНКО М.В.

к.т.н., с.н.с., доцент кафедры микро- и наноэлектроники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: mykhailo.kirichenko@khpі.edu.ua;

МИНАКОВА К.А.

к.ф.-м.н., доц., доцент кафедры физики Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: kseniia.minakova@khpі.edu.ua;

ТОМАШЕВСКИЙ Р.С.

д.т.н., проф., директор учебно-научного института энергетики, электроники и электромеханики Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: roman.tomashevskiy@khpі.edu.ua;

НИКИТИН В.А.

Научный сотрудник кафедры микро- и наноэлектроники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: bicmor@ukr.net;

ХАРЧЕНКО Н.М.

Научный сотрудник кафедры микро- и наноэлектроники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: hnm@ukr.net

Цель работы. Внедрение электронной нагрузки для испытания высокоточных низковольтных источников (солнечных батарей) требует тщательного просмотра не только схемотехнической конструкции, но и теплотехнической и механической конструкции. В статье рассматривается принцип создания и расчета оптимального решения для реализации электронной нагрузки.

Методы исследования. Для достижения цели используются методы анализа современной электронной базы, расчет основных физических и электрических параметров и их моделирование.

Полученные результаты. На основе рассмотренных физико-схемных решений для реализации электронного блока нагрузки была разработана соответствующая электрическая схема. Транзисторы управляются четырьмя униполярными операционными усилителями, интегрированными в микросхему LM324. Управление электронным блоком нагрузки реализуется путем управления напряжением на клеммах положительной обратной связи, дополнительно стабилизируемой микросхемой TL431. Устройство питается от источника постоянного стабилизированного тока напряжением 12 В (обеспечивает дополнительную фильтрацию от колебаний напряжения).

Научная новизна. Современные достижения в разработке солнечных элементов и других низковольтных источников энергии привели к необходимости создания компактных и экспрессных систем их тестирования, которые нельзя реализовать на существующих решениях.

Практическая ценность. Соблюдение показаний и принципов, изложенных в этой статье, обеспечит на-

грузке возможность работать на большой мощности, и при этом сохранить хорошие характеристики и надежность. Разработанная схема позволяет создать компасное устройство для экспрессного тестирования солнечных батарей.

Ключевые слова: электронная нагрузка; MOSFET; солнечные элементы; системы тестирования; автоматизация.

CALCULATION OF THE ELECTRONIC LOADING SCHEME FOR TESTING LOW VOLTAGE SOURCES

- ZAITSEV R.V.** Dr.Sc., Senior Researcher, Head of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: roman.zaitsev@khpi.edu.ua;
- KIRICHENKO M.V.** PhD, Senior Researcher, Associate Professor of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: mykhailo.kirichenko@khpi.edu.ua;
- MINAKOVA K.O.** PhD, Associate Professor, Associate Professor of Physics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua;
- TOMASHEVSKII R.S.** Dr.Sc., Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Energy, Electronics and Electromechanics National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: roman.tomashevskiyi@khpi.edu.ua;
- NIKITIN V.O.** Researcher of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: bicomop@ukr.net;
- KHARCHENKO M.M.** Researcher of Micro- and NanoElectronics Department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: hnm@ukr.net

Purpose. The introduction of electronic load for testing high-precision low-voltage sources (solar panels) requires careful review not only of the circuit design, but also thermal and mechanical design. The article considers the principle of creating and calculating the optimal solution for the implementation of electronic load.

Methodology. To achieve this goal, methods of analysis of modern electronic database, calculations of basic physical and electrical parameters and their modeling are used.

Findings. Based on the considered physical and circuit solutions for the implementation of the electronic load unit, a corresponding electrical circuit was developed. The transistors are controlled by four unipolar operational amplifiers integrated into the LM324 chip. Control of the electronic load unit is implemented by controlling the voltage at the positive feedback terminals, which is further stabilized by the TL431 chip. The device is powered by a source of DC stabilized current of 12 V (provides additional filtering from voltage fluctuations).

Originality. Modern advances in the development of solar cells and other low-voltage energy sources have led to the need to create compact and express systems for testing them, which cannot be implemented on existing solutions.

Practical value. Adherence to the indications and principles set out in this article will provide the load with the ability to work at high power, while maintaining good performance and reliability. The developed scheme allows to create a compass device for express testing of solar panels.

Keywords: *electronic load; MOSFET; solar cells; testing systems; automation.*

REFERENCES

- [1] Mazumder, G.C., Biswas, P.R., Shams, N., et. al. (2016). Development of a computerized I-V-tracing system for solar PV module testing. International Journal of Scientific & Technology Research, 5, 6, 328-333. 10.11591/ijece.v1i13.pp2011-2018.
- [2] Beye, M.L., Wickramasinghe, T., Mognotte, J.F., et. al. (2018). Active Gate Driver and Management of the Switching Speed of GaN Transistors during Turn-On and Turn-Off. Electronics, 10, 2, 106-119. 10.3390/electronics10020106.
- [3] Nel, G., Doorsamy, W. (2018). Development of an Intelligent Electronic Load Controller for Stand-Alone Micro-Hydropower Systems. 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica, 18202117. 10.1109/PowerAfrica.2018.8521133.
- [4] Ichino, S., Mawaki, T., Teramoto, A., et. al. (2017). Analysis of Random Telegraph Noise Behaviors toward Changes of Source Follower Transistor Opera-

- tion Conditions using High Accuracy Array Test Circuit. *IEICE Tech. Rep.*, 117, 260, 57-62.
- [5] Zaitsev, R.V., Kirichenko, M.V., Khrypunov, G.S., Prokopenko, D.S., Zaitseva, L.V. (2017). Development of hybrid solar generating module for high-efficiency solar energy station. *First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, 360-364. 10.1109/UKRCON.2017.8100510.
- [6] Scherback, Ya.V., Plakhtiy, O.A., Nerubatskiy, V.P. (2017). Control characteristics of active four-quadrant converter in rectifier and recovery mode. *Technical Electrodynamics*, 6, 26-31. 10.15407/techned2017.06.026.
- [7] Tsibizov, A., Kovačević-Badstübner, I., Kakarla, B., et. al. (2020). Accurate Temperature Estimation of SiC Power Mosfets Under Extreme Operating Conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35, 2, 1855-1865. 10.1109/TPEL.2019.2917221.
- [8] Eremenko, V.V., Sirenko, V.A., Gospodarev, I.A. (2017). Electron and phonon states localized near the graphene boundary. *LowTemp. Phys.*, 43, 11, 1323-1331. 10.1063/1.5010320.
- [9] Zaitsev, R.V., Kopach, V.R., Kirichenko, M.V., et. al. (2010). Single-crystal silicon solar cell efficiency increase in magnetic field. *Functional Materials*, 17, 4, 554-557.
- [10] Eremenko, V.V., Sirenko, V.A., Gospodarev, I.A., et. al. (2018). Electron spectra of graphene with local and extended defects. *Journal of Physics: Conference Series*, 969, 1, 012021. 10.1088/1742-6596/969/1/012021.
- [11] Kirichenko, M.V., Zaitsev, R.V., Dobrozhan, A.I., et. al. (2017). Adopting of DC magnetron sputtering method for preparing semiconductor films. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, 108-111.
- [12] Khrypunov, G.S., Kopach, G.I., Zaitsev, R.V., et. al. (2017). Flexible solar cells are based on underlying layers of CdTe obtained by magnetron sputtering. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 9, 2, 02008-1-02008-5. 10.21272/jnep.9(2).02008.
- [13] Taur, Y., Lin, H.-H. (2018). Modeling of DG MOSFET I – V Characteristics in the Saturation Region. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65, 5, 1714-1720. 10.1109/TED.2018.2818943.
- [14] Bin Mohd Yusof, M.A., Tsukiji, N., Kobori, Y., et. al. (2018). A Study on Loop Gain Measurement Method Using Output Impedances in Operational Amplifier. *J. Tech. Soc. Sci.*, 2, 3, 19-28. 10.1587/transcom.2017EBP3358.
- [15] Altun, M., Kuntman, H. (2008). Design of a fully differential current mode operational amplifier with improved input–output impedances and its filter applications. *International Journal of Electronics and Communications*, 62, 3, 239-244. 10.1016/j.aee.2007.03.020.
- [16] Khera, N., Tiwari, S. (2016). Prognostics of Power MOSFET due to unclamped inductive switching. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, 16672709. 10.1109/ICPEICES.2016.7853316.
- [17] Irving, B.T., Panov, Y., Jovanovic, M.M. (2003). Small-signal model of variable-frequency flyback converter. *Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 7845817. 10.1109/APEC.2003.1179335.

УДК 621.316.13

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПРОХІДНОГО ПОЛІМЕРНОГО ІЗОЛЯТОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧОК КОНЦЕНТАРЦІЇ ПОЛЯ

- ШЕВЧЕНКО С.Ю.** доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: sergii.shevchenko@khpri.edu.ua;
- 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;
- ВЯЗОВИЧЕНКО Ю.А.** канд. техн. наук, доцент кафедри динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: viazovychenko.julia@gmail.com;
- ПОТРИВАЙ А.Е.** студент кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: potrybay.andrey99@mail.com;
- ЦЮПА В.М.** студент кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: vladyslav.tsiupa@gmail.com;

Мета роботи. Використання моделювання, як інструменту, що дозволить виявляти слабкі місця конструкції в електричному обладнанні та на їх основі виконати її оптимізацію, з метою нівелювання слабкостей через недосконалість конструкції. Позначення реально існуючої проблеми в конструкціях прохідних полімерних ізоляторів, що негативно впливають на їх техніко-економічних та експлуатаційних характеристика і робить їх менш конкурентними у порівнянні з іншими типами ізоляторів.

Методи дослідження. Аналіз експериментів по виявленню часткових розрядів, моделювання напруженості електричного поля, синтез аналізованих робіт та результатів моделювання.

Отримані результати. В результаті виконаного наукового дослідження було виявлено, що безпосередній вплив на електричну міцність прохідного полімерного ізолятора має процес виникнення часткових розрядів. Даний факт прийнято за основу для пошуку методів подальшого впливу на конструкцію ізолятора, з метою збільшення строку його служби. В роботі виявлено, що причиною виникнення часткових розрядів є нерівномірність розподілу напруженості електричного поля. Це послужувало причиною для подальшого дослідження напруженості електричного поля прохідного ізолятора та його моделювання. В результаті моделювання, було виявлено точки концентрації напруженості електричного поля в прохідному полімерному ізоляторі та позначено їх, як точки впливу для підвищення електричної міцності прохідного полімерного ізолятора.

Наукова новизна. Наукова новизна виконаної науково-дослідної роботи полягає у використанні моделювання електричного поля полімерного прохідного ізолятора, як інструмента для виявлення слабких місць в його конструкції, при впливі на котрі можна буде спостерігати позитивний вплив на його технічні характеристики.

Практична цінність. Практична цінність виконаної науково-дослідної роботи полягає в тому, що результати дослідження слугують міцним фундаментом для подальшої оптимізації конструкції прохідних полімерних ізоляторів, що призводитиме до позитивного впливу на їх технічні характеристики та зробить їх конкурентними у порівнянні з іншими типами ізоляторів.

Ключові слова: прохідний ізолятор; електричне поле; метод кінцевих елементів; моделювання; ansys maxwell; оптимізація напруженості електричного поля.

I. ВСТУП

Серед головних вимог до енергосистем світу та України в тому числі, є вимога по безперебійному забезпеченню електроенергією споживачів [1]. Забезпечення надійності ланок відбувається за рахунок їх рівня надійності в аварійному, післяаварійному та

номінальному режимах.

Серед цих ланок, на ряду з трансформаторами, вимикачами та автоматикою стоять ізолятори, оскільки вони є невід'ємною ланкою та одним з ланцюгів надійності енергосистеми. І в кожному з типів ізоляторів, що зустрічаються в системі (підвісні, прохідні, опорні), є свої характерні особливості по забезпечен-

ню надійності.

Найбільш частою причиною руйнування саме полімерних ізоляторів є виникнення часткових розрядів, що пов'язано з нерівномірністю розподілу напруженості електричного поля по поверхні ізолятора.

Тому метою роботи стало отримання карти напруженості електричного поля полімерного прохідного ізолятора та пошук засобів його оптимізації.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На відміну від механічної руйнації ізолятора при електричному пробі, характерного, наприклад, для фарфору та скла, електричним руйнуванням для полімеру є утворення провідного каналу діелектриці, що знаходиться між електродами в прикладеному електричному полі. Оскільки електричне руйнування має складний тимчасовий характер, то до теперішнього часу не існувало теорії, що адекватно описує цей процес [2]-[5]. На основі загальних уявлень про процеси та механізми електричного старіння, як найважливішого фактора у фізико-хімічних процесах старіння [6], [7], його можна умовно розділити на два періоди часу. Перший з них – час 1τ від початку застосування номінального робітника

напруги до зародження будь-яких первинних дефектів (для полімерів у виді деревоподібних каналів, заповнених газом). В нормальних умовах експлуатації 1τ може досягати значень порядку багатьох років [2], [7] без помітне зниження електричної міцності.

Другий період характеризується часом 2 від зародження дендритів до пробою. Дендрити виникають у місцях підвищеної локальної напруженості поля. Такими характерними місцями, для практично всіх видів ізоляції, є неоднорідні поверхні електродів і що межують із ними діелектриків, що проводять включення, мікротріщини та порожнини на поверхнях та в обсязі діелектриків. Тривалість періоду 2τ визначається низкою процесів: інжектування електронів з електродів, формування та еволюція об'ємних зарядів різних знаків; іонізація полімерних процесів. В цілому, 2τ може змінюватись від 1 до 106 секунд і багато в чому визначається температурою, електричним полем та режимом роботи електромережі.

Зародження дендритів супроводжується порушенням суцільності матеріалу і характеризується електричними (часткові розряди), акустичними, тепловими та оптичними ефектами, що дозволяє за допомогою різних фізичних методів реєструвати початкову фазу зародження дендритів. Особливо важливим моментом є вивчення часткових характеристик розрядів (ЧР), оскільки в полімерах, на відміну від інших типів діелектриків, подальше зростання дендритів відбувається під дією ЧР на канали дендритів. Таким чином, зростання дендритів та параметри ЧР (інтенсивність, частота повторення) є взаємопов'язаними процесами, що призводять, зрештою в результаті, до пробую ізоляції внаслідок перекриття міжелектродного про-

міжку дендритом.

Як показали попередні теоретичні та експериментальні [7,8] дослідження процесів електричного пробую високовольтних виробів, полімерних матеріалів можна умовно уявити кілька видів пробуюв, найбільш характерних для всіх типів обладнання (ізоляторів, кабелів, обмоток).

1. Пробій вздовж меж розділу двох різних діелектриків, наприклад, вздовж кордонів полімер – газ (поверхневий пробій) або межі стрижень – оболонка для високовольтних ізоляторів

2. Пробій вздовж кордону електрод – діелектрик. Для кабелів це відповідає пробуюм струмопровідна жила – діелектрик – металевий екран; для ізоляторів – металева арматура (кінцевик) – діелектрик.

3. Пробій в обсязі діелектрика через малі каверни, неоднорідності структури.

На сьогодні найповніше досліджено третій вид пробую, який відбувається за відносно невисоких напруженостей поля. Такий мікророзряд можна вважати класичним видом ЧР, що виникає за двома причин: газ усередині каверни має нижчу електричну міцність, ніж твердий діелектрик, внаслідок відмінностей у діелектричній проникності. Отже, напруженість поля всередині каверни вище, ніж зовні, тому ймовірність виникнення ЧР у каверні залежить від локального поля усередині неї. Через деякий час поле мікропробую ЧР у каверні згасає внаслідок накопичення зарядів на її поверхні, що частково компенсують внутрішнє поле.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної науково-дослідної роботи є аналіз особливостей та причин виникнення часткових розрядів в полімерних прохідних ізоляторів, використання моделювання розподілу напруженості електричного поля по його поверхні, як інструменту для виявлення недосконалостей конструкції, з метою впливу на них та підвищення електричної міцності.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Надійність прохідних ізоляторів визначається їхньою конструкцією (рис. 1). Розташування високовольтних та заземлюючих електродів таке, що може призвести до виникнення ЧР як в ізоляції, так і на поверхні. Таким чином, можливі дефекти аналогічні силовим кабелям та ізоляторам.

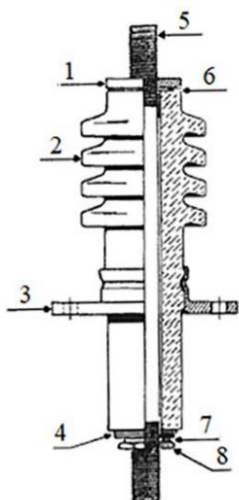


Рисунок 1. Приклад конструкції прохідного ізолятора: 1-кришка, 2- ізолятор, 3- кріпильний фланець, 4- зм'якшуюча шайба, 5- ходовий гвинт з обох кінців, 6- щільнююча шайба, 8- зажимна гайка.

Поверхневі розряди залежать від забруднення ізолятора. Отже, ми можемо припустити, що характеристики часткових розрядів та діаграми АФРЧР у цьому випадку аналогічно забруднення опорних ізоляторів. Крім того, забруднення поверхні може викликати перекриття ізоляції, внаслідок якого зазвичай спрацьовує автоматичне вимкнення пошкодженого елемента системи. Проте часто такі пошкодження усуваються автоматичним повторним увімкненням. Дослідження внутрішніх дефектів прохідних ізоляторів важливіше, оскільки їхнє зростання призводить до незворотних відмов, які вимагають аварійного обслуговування обладнання.

Дефекти всередині ізоляційного шару зазвичай виникають на етапі виготовлення прохідних ізоляторів. Такі дефекти часто можна виявити шляхом їхнього початкового тестування перед встановленням на трансформатор. Однак матеріали введення з часом можуть руйнуватися. В результаті в ізоляційному шарі можуть з'явитися неоднорідності електричного поля, що призведе до пробоя ізоляції. Ймовірно, найслабша частина введення в даному випадку це прокладання між високовольтним електродом та корпусом ізолятора. Зношування прокладки веде до утворення контакту між високовольтним електродом та корпусом ізолятора, результатом якого може бути руйнування тіла прохідного ізолятора через виникнення часткових розрядів.

У роботі було прийнято припущення, що сколи на поверхні прохідного ізолятора можуть впливати лише на поверхневі розряди.

Для більш детального розгляду розвитку ЧР в прохідному ізоляторі, звернемося до експериментальної частини роботи [9]. Для даної роботи вдалося отримати від виробника прохідний ізолятор із приро-

дним дефектом. Дефект виник у процесі виготовлення і виявили при початкових випробуваннях. Причому візуально дефект не виявлявся.

В експериментальному зразку прохідного ізолятора було виміряно часткові розряди. Він був підвищений з використанням діелектричної балки, щоб звести до мінімуму можливі розряди в повітрі, крім внутрішніх та поверхневих розрядів у прохідному ізоляторі. Початкове випробування показало відсутність розрядів на 10 кВ, що є робочою напругою введення. Однак напруга 12 кВ призвела до появи часткових розрядів. Подальше підвищення напруги показало, що при 15 кВ інтенсивність часткових розрядів була високою і більше напруга не збільшувалася. Результати випробувань показали, що потужність ЧР склала 102 мВт, а середній заряд — 47 нКл. Діаграма АФРЧР відповідає дефекту високовольтного електрода (рис. 2).

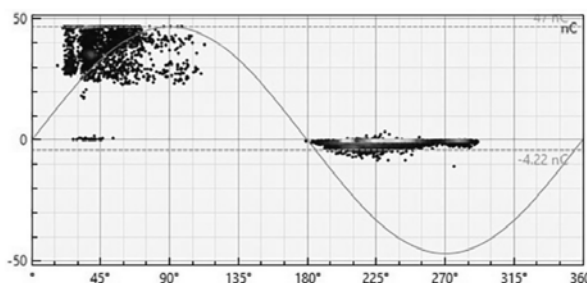


Рисунок 2. Діаграма ФРЧР введення на 15 кВ

Причиною таких результатів вимірів можливо те, що прохідний ізолятор мав гострі краї на високовольтному електроді. Імовірно, зареєстровані розряди частково або повністю могли бути розрядами в повітрі. Тому було вирішено сточити гострі краї введення і повторити випробування.

Вимірювання ЧР у введенні без гострих країв не показало значної зміни характеристик ЧР порівняно з первісним випробуванням (рис. 3).

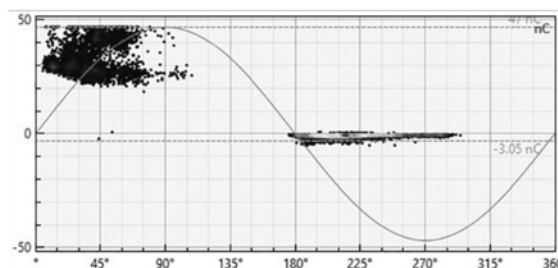


Рисунок 3. Діаграма АФРЧР після шліфровки на 15 кВ

Потужність ЧР становила 136 мВт, середній заряд, що здається, становив 47 нКл. Результати вимірювання характеристик ЧР при напрузі до 15 кВ (рис. 4, 5).

Після вимірювань зразок введення був досліджений руйнівним методом на наявність та розташування дефекту. На рисунку 1. видно, що всередині введення не виявлено візуальних дефектів.

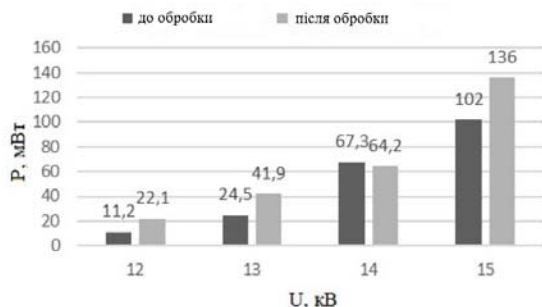


Рисунок 4. Результати вимірювання потужності часткових розрядів у прохідному ізоляторі до та після шліфування

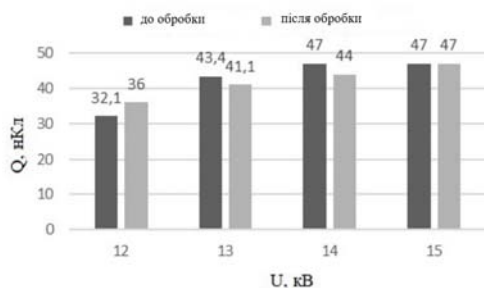


Рисунок 5. Результати вимірювання середнього заряду часткових розрядів у введенні до та після шліфування

У досліджуваному зразку введення КРУ при робочій напрузі 10 кВ ЧР не зареєстровано. Вони почали виникати при 12 кВ та їх інтенсивність значно зростає зі збільшенням напруги.

Шліфування гострих країв прохідного ізолятора не мало істотного впливу на характеристики ЧР. Заряд ЧР, що здається, до і після вимірювання мав близькі значення. Потужність ЧР у більшості вимірів збільшилася після шліфування гострих країв введення, тоді як вона повинна була зменшитися, якщо краї впливали виникнення розрядів.

Таким чином, можна вважати, що результати виміру ЧР показали наявність дефекту усередині прохідного ізолятора. Однак за його руйнівному дослідженні не виявлено видимого дефекту усередині ізоляційного шару.

Таким чином, ймовірно, дефект був в області прокладання між високовольтним електродом та корпусом ізолятора. Однак розташування дефекту може відрізнитися, оскільки зразок введення не експлуатувався протягом тривалого часу та видимі дефекти могли не з'явитись під час випробування.

Для порівняння характеристик часткових розрядів у прохідному ізоляторі логічно розглянути аналогічні характеристики для опорних ізоляторів та силових кабелів (рис. 6, 7). Основними відмінними рисами характеристик ЧР у прохідних ізоляторах є невеликі кількості ЧР з незначними зарядами, що здають-ся. У позитивній напівхвилі напруги живлення більшість зареєстрованих ЧР були вище 20 нКл. У те Водночас у негативній півхвилі ЧР не перевищували 10 нКл.

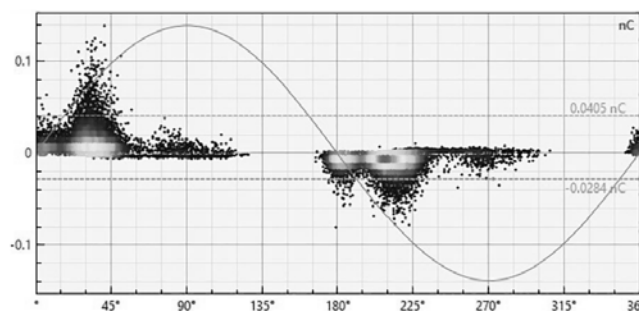


Рисунок 6. Діаграма АФРЧР для опорного ізолятора

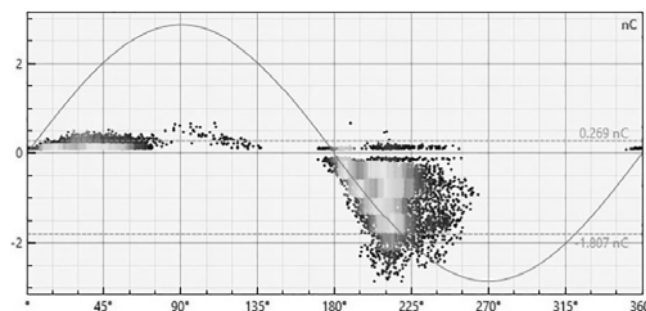


Рисунок 7. Діаграма АФРЧР для силового кабелю

Результати вимірювань показали незначну різницю у характеристиках ЧР до та після шліфовки. Тому припущено, що втулка має внутрішній дефект. Проте після дослідження щодо руйнування прохідного ізолятора візуально виявити його не вдалося. Крім того, отримана діаграма АФРЧР дефекту прохідного ізолятора має невелику кількість розрядів малої інтенсивності у позитивній напівхвилі напруги. Ймовірно, дефекти можуть бути виявлені за допомогою цієї особливості діаграм АФРЧР.

З даного дослідження можна зробити висновки, що саме неоднорідність розподілу напруженості електричного поля спричиняє виникнення часткових розрядів і в результаті призводить до руйнування ізоляційного тіла. Це означає, що для вирішення завдання забезпечення максимальної електричної міцності, необхідно оптимізувати напруженість електричного поля ізолятора. Для цього необхідно визначити точки концентрації напруженості електричного поля, для чого виконується моделювання об'єкту в ANSYS MAXWELL з метою отримання карти напруженості

електричного поля.

Для моделювання електричного поля полімерного ізолятора було виконано креслення в Autodesk AutoCAD. За основу прийнято аналог ізолятора ППЦ з номінальною напругою 35 кВ та струмом 800 А. Це креслення виконано за даними МЕК. Його конструкція є недосконалою через показники наявності часткових розрядів та міцності.

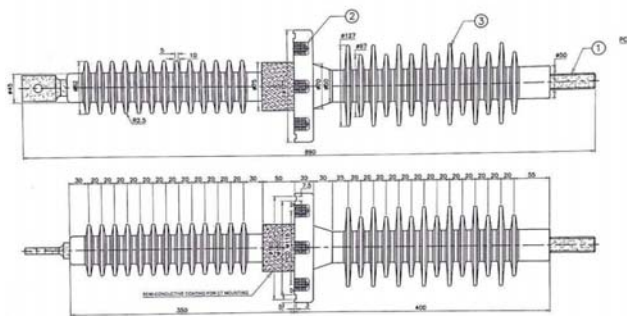


Рисунок 8. Креслення полімерного прохідного ізолятора в Autodesk AutoCAD



Рисунок 9. 3d-модель полімерного прохідного ізолятора в Autodesk AutoCAD

Через осьову симетрію моделі, аналіз розподілу електричного поля виконується у всіх частинах моделі. В самій же моделі передбачено чотири частини: стержень, діелектрик, заземлююча частина та вакуум, що виступає в ролі середовища.

Нелінійне рівняння у приватних похідних чисельної моделі вирішується у двовимірній області з урахуванням симетрії проблеми. У результаті чисельного моделювання виводяться електричні потенційні функції моделі.

Проблеми представлені диференціальними рівняннями з граничними умовами, що називаються граничними задачами. Є три класи граничних задач. Це задача Діріхле, задача Неймана та змішані граничні задачі.

Для моделювання електричного поля, використаємо програму ANSYS Maxwell.

Тепер модель готова для аналізу. Аналіз виконується з допущенням 1% похибки для пришвидшення моделювання (по причині недостатньої потужності обчислювальної машини). Результати моделювання наведено на рис. 10.

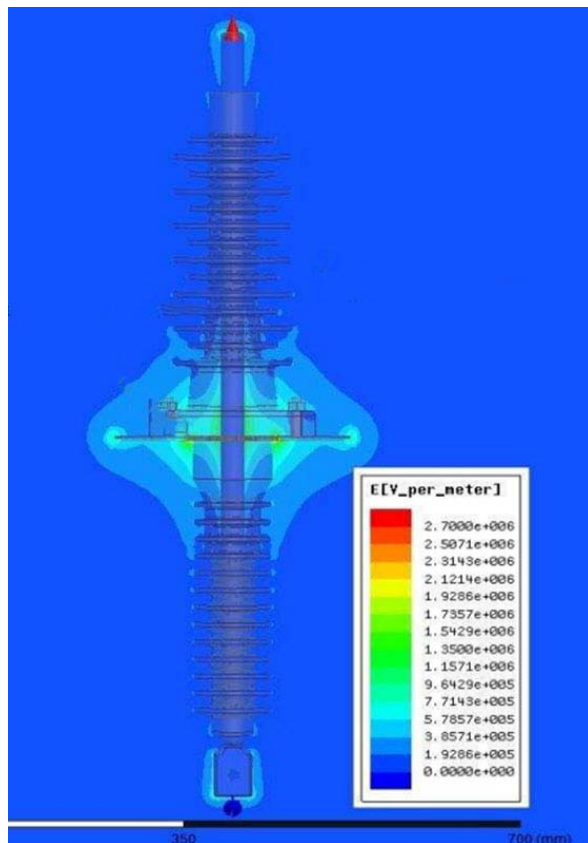


Рисунок 10. Результати моделювання напруженості електричного поля полімерного прохідного ізолятора в програмі ANSYS Maxwell

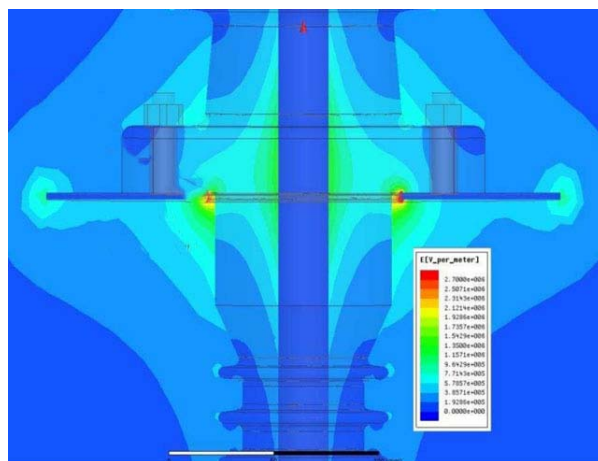


Рисунок 11. Результати моделювання напруженості електричного поля (збільшений масштаб інтересуючої зони) полімерного прохідного ізолятора в програмі ANSYS Maxwell

Так за, результатами моделювання, визначено, що одною з проблемних ділянок є місце стику фланцю з плитою. Це призводить до нерівномірного розподілу напруженості по поверхні об'єкту, що потребує коригування. Усунення даного недоліку може значно підвищити ефективність використання полімерних прохідних ізоляторів, оскільки оптимізація електричного поля призводить до значно меншого ризику виникнення часткових розрядів та подальшого руйнування ізоляції, до чого є полімерні ізолятори є дуже вразливими.

V. ВИСНОВКИ

В науково-дослідній роботі було виконано моделювання напруженості електричного поля прохідного полімерного ізолятора 35кВ для виявлення перспективних, з точки зору поліпшення електричної міцності конструкції, точок впливу для зменшення вірогідності розвитку часткових розрядів в діелектричному матеріалі. Після моделювання було виявлено, що найбільший рівень напруженості спостерігається у місці стикування ізолятора. Таким чином, виявлено шлях оптимізування напруженості електричного поля прохідного полімерного ізолятора, що може зробити його ще більш електрично міцним, що зробить його більш релевантним у використанні за фарфорові, та за рахунок його інших властивостей створить значний позитивний економічний ефект при експлуатації.

Підсумовуючи все вищесказане можна з упевненістю заявляти, що шляхом дослідження напруженості електричного поля на ізоляторах, шляхом моделювання, можна ефективно провести аналіз великої кількості конфігурацій ізоляторів та знайти найбільш ефективну з економічної та технічної точки зору.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Про затвердження Кодексу системи передачі. Документ v0309874-18, чинний, Редакція від 30.12.2021. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#n23>
- [2] Shevchenko, Sergii, et al. "Devising A Method For Reducing Active Power Corona Losses Based On Changing The Structural Parameters of A Power Transmission Line." Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1.8 (2022): 115.
- [3] Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1994.
- [4] Шевченко, С. Ю., Д. О. Данильченко, and С. І. Дривецький. "Забезпечення надійного електропостачання військових об'єктів." Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» до друку протокол № 9 від 24.09. 21 р. колектив авторів: Чепков ІБ, Бісик СП, Миронюк ОЮ, Сливінський ОА (2021): 265.
- [5] Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и дотационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: ИЭФ РАН, 2000.
- [6] Wu K. Suzuoki Y, Dissado L.A. The contribution of discharge area variation to partial discharge pattern in disk voids. J. Phys D. Appl.Phys. 2004. v 37, №7. p 1815- 1823
- [7] Куперштох А.Л., Стамателатос, С.П. Агорис Д.П. Моделирование частичных разрядов в твердых диэлектриках при переменном напряжении // Письма в ЖТФ. 2006. 32 вып. 15. С.74-80.
- [8] Слущер А.И., Поликарпов Ю.И., Галяров В.Л. Об элементарных актах в кинетике электрического разрушения полимеров // ЖТФ. 2006. Т.76. Вып.12. С.52-56
- [9] Paoletti P.E., Golubev A. Partial discharge theory and applications to electrical equipment. Tappi conference 1999, p.23-46.
- [10] Носков М.Д., Малиновский А.С., Закк М., Шваб А. Моделирование роста дендритов и частичных разрядов в эпоксидной смоле II // ЖТФ. 2002. Э2. Вып.2. С. 121-128.
- [11] Поляков Д.А., Теращенко Н.А., Нікітін К.І. Дослідження відмінних особливостей характеристик часткових розрядів в прохідних ізоляторах.
- [12] Diahovchenko, Illia M., et al. "Protection of Digital Power Meters Under the Influence of Strong Magnetic Fields." 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). IEEE, 2019.
- [13] Shevchenko, Sergiy, Dmytro Danylchenko, and Stanislav Dryvetskyi. "Experimental Research of the Electrical Strength of the Insulated System "Protected Wire-Line Insulator"." 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). IEEE, 2020.
- [14] Diahovchenko, Illia, et al. "Rogowsky coil applications for power measurement under non-sinusoidal field conditions." Energetika 65.1 (2019).
- [15] Khasawneh, Alaa, et al. "Methodology for Accounting for the Influence of Dust Cover on the Performance of a Photovoltaic System for Matlab Simulink." 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). IEEE, 2021.

Стаття надійшла до редакції 29.04.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОХОДНОГО ПОЛИМЕРНОГО ИЗОЛЯТОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧЕК КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛЯ

- ШЕВЧЕНКО С.Ю. доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой передачи электроэнергии Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: sergii.shevchenko@khpі.edu.ua;
- ДАНИЛЬЧЕНКО Д.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры передачи электрической энергии Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", Харьков, Украина, e-mail: dmytro.danylchenko@khpі.edu.ua;
- ВЯЗОВИЧЕНКО Ю.А. канд. техн. наук, доцент кафедры динамики и прочности машин Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", Харьков, Украина, e-mail: viazovychenko.julia@gmail.com;
- ПОТРЫВАЙ А.Э. студент кафедры передачи электрической энергии Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", Харьков, Украина, e-mail: potrybay.andrey99@mail.com;
- ЦЮПА В.Н. студент кафедры передачи электрической энергии Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", Харьков, Украина, e-mail: vladyslav.tsiupa@gmail.com;

Цель работы. Использование моделирования как инструмента, позволяющего выявлять слабые места конструкции в электрическом оборудовании и на их основе выполнить ее оптимизацию, с целью нивелирования слабостей из-за несовершенства конструкции. Обозначение реально существующей проблемы в конструкциях проходных полимерных изоляторов, что негативно влияет на их технико-экономическую и эксплуатационную характеристику и делает их менее конкурентными по сравнению с другими типами изоляторов.

Методы исследования. Анализ экспериментов по выявлению частичных разрядов, моделирование напряженности электрического поля, синтез анализируемых работ и результатов моделирования.

Полученные результаты. В результате выполненного научного исследования было обнаружено, что непосредственное влияние на электрическую прочность проходного полимерного изолятора оказывает процесс возникновения частичных разрядов. Данный факт принят за основу для поиска методов дальнейшего воздействия на конструкцию изолятора с целью увеличения срока его службы. В работе обнаружено, что причиной возникновения частичных разрядов является неравномерность распределения напряженности электрического поля. Это послужило причиной для дальнейшего исследования напряженности электрического поля проходного изолятора и его моделирования. В результате моделирования были обнаружены точки концентрации напряженности электрического поля в проходном полимерном изоляторе и обозначены их как точки воздействия для повышения электрической прочности проходного полимерного изолятора.

Научная новизна. Научная новизна выполненной научно-исследовательской работы заключается в использовании моделирования электрического поля полимерного проходного изолятора как инструмента для обнаружения слабых мест в его конструкции, при воздействии на которые можно будет наблюдать положительное влияние на его технические характеристики.

Практическая ценность. Практическая ценность проделанной научно-исследовательской работы заключается в том, что результаты исследования служат прочным фундаментом для дальнейшей оптимизации конструкции проходных полимерных изоляторов, что приведет к положительному воздействию на их технические характеристики и сделает их конкурентными по сравнению с другими типами изоляторов.

Ключевые слова: проходной изолятор; электрическое поле; метод конечных элементов; моделирование; ansys maxwell; оптимизация напряженности электрического поля

SIMULATION OF THE ELECTRIC FIELD OF A POLYMERIC INSULATOR BUSHING TO DETERMINE THE FIELD CONCENTRATION POINTS

- SHEVCHENKO S.Y.** doctor of tech. Sci., Professor, Head of the Department of Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: sergii.shevchenko@khp.edu.ua;
- DANYLCHENKO D.A.** cand. tech. Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: dmytro.danylchenko@khp.edu.ua;
- VYAZOVICHENKO Y.A.** cand. tech. Sci., Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: viazovychenko.julia@gmail.com;
- POTRYVAI.A.E.** student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: potrybay.andrey99@mail.com;
- CYUPA V.N.** student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: vladyslav.tsiupa@gmail.com;

Purpose. The use of modeling as a tool that will identify the weaknesses of the structure in electrical equipment and on their basis to perform its optimization, in order to eliminate weaknesses due to structural imperfections. Designation of a real problem in the design of polymer bushings, which negatively affects their technical, economic and operational characteristics and makes them less competitive compared to other types of insulators.

Methodology. Analysis of experiments to detect partial discharges, simulation of electric field strength, synthesis of analyzed works and simulation results.

Findings. As a result of the performed scientific research, it was found that the process of partial discharges has a direct effect on the electrical strength of the polymer bushing insulator. This fact is taken as the basis for searching for methods of further influence on the insulator design in order to increase its service life. It was found in the work that the reason for the occurrence of partial discharges is the uneven distribution of the electric field strength. This was the reason for further study of the electric field strength of the pass-through insulator and its modeling. As a result of the simulation, points of concentration of the electric field strength in the bushing polymer insulator were found and designated as points of action to increase the electrical strength of the bushing polymer insulator.

Originality. The scientific novelty of the performed research work is the use of modeling the electric field of the polymer bushing as a tool to identify weaknesses in its design, under the influence of which it will be possible to observe a positive impact on its technical characteristics..

Practical value. The practical value of the research work done is that the results of the research serve as a solid foundation for further optimization of the design of polymer bushings, which will lead to a positive impact on their technical characteristics and make them competitive compared to other types of insulators..

Keywords: bushing insulator; electric field; end element method; modeling; ansys maxwell; electric field strength optimization.

REFERENCES

- [1] On approval of the Transmission System Code. Document v0309874-18, valid, Edition dated 30.12.2021. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#n23>.
- [2] Shevchenko, Sergii, et al. "Devising A Method For Reducing Active Power Corona Losses Based On Changing The Structural Parameters of A Power Transmission Line." Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1.8 (2022): 115.
- [3] Ushakov V.Ya. (1994). Insulation of high voltage installations. M.: Energoatomizdat.
- [4] Vershinin Yu.N. (2000). Electron-thermal and sub-
- [5] Shevchenko, S. YU., D. O. Danylchenko, and S. I. Dryvets'kyy. "zabezpechennya nadiynoho elektro-postachannya viys'kovykh ob'yektiv." Rekomendovano Vchenoyu radoyu Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut» do druku protokol № 9 vid 24.09. 21 r. KOLEKTYV AVTORIV: Chepkov IB, Bisyk SP, Myronyuk OYU, Slyvins'kyy OA (2021): 265.
- [6] Wu K. Suzuoki Y, Dissado L.A. (2004). The contribution of discharge area variation to partial discharge pattern in disk voids. J. Phys D. Appl.Phys. 37, No 7. p 1815- 1823

- [7] Kupershtoch A.L., Stamatelatos, S.P. Agoris D.P. (2006). Simulation of partial discharges in solid dielectrics at alternating voltage // Letters to ZhTF. 32 issue. 15. P.74-80
- [8] Slutsker A.I., Polikarpov Yu.I., Galyarov V.L. (2006). On elementary acts in the kinetics of electrical destruction of polymers // JTF. V.76. Issue 12. S.52-56
- [9] Paoletti P.E., Golubev A. (1999). Partial discharge theory and applications to electrical equipment. Tappi conference, p.23-46
- [10] Noskov M.D., Malinovsky A.S., Zakk M., Shvab A. (2006). Simulation of dendrite growth and partial discharges in epoxy resin II // JTF. E2. Issue 2. pp. 121-128
- [11] Polyakov D.A., Terashchenko N.A., Nikitin K.I. *To_l_dzhennya v_dm_nnyh* features of the characteristics of the chastkovy discharges in the passages of the insulator
- [12] Diahovchenko, Illia M., (2019). et al. "Protection of Digital Power Meters Under the Influence of Strong Magnetic Fields." 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). IEEE.
- [13] Shevchenko, Sergiy, Dmytro Danylchenko, and Stanislav Dryvetskyi. (2020). "Experimental Research of the Electrical Strength of the Insulated System "Protected Wire-Line Insulator"." 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). IEEE.
- [14] Diahovchenko, Illia, et al. (2019). "Rogovsky coil applications for power measurement under non-sinusoidal field conditions." *Energetika* 65.1.
- [15] Khasawneh, Alaa, et al. (2021). "Methodology for Accounting for the Influence of Dust Cover on the Performance of a Photovoltaic System for Matlab Simulink." 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). IEEE.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ЕНЕРГОЄМНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

ДУБРОВІН В.І. канд. техн. наук, професор, професор кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: vdubrovin@gmail.com;

ДЕЙНЕГА Л.Ю. старший викладачка кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: deynega.larisa@gmail.com;

ЛАКТІОНОВ В.В. Студентка федри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: wuknait@gmail.com;

Мета роботи. Дослідити методи прийняття рішень при управлінні портфелями проектів, а також виконати їх програмну реалізацію в складі системи оптимізації управління портфелями проектів енергозбереження на енергоємних підприємствах.

Методи дослідження. Для реалізації поставленої мети була обрана портфельна теорія Марковіца – теорія фінансових інвестицій, у межах якої за допомогою методів оптимізації здійснюється якомога вигідніший розподіл ризику портфеля цінних паперів і оцінювання доходу. В поєднанні з портфельною теорією було використано методи пошуку максимального коефіцієнта Шарпа та мінімальної волатильності за даними випадково згенерованих портфелів.

Отримані результати. Методи управління портфелями проектів енергозбереження розглянуті через їх узагальнення до методів оптимізації інвестиційних портфелів, але з врахуванням специфіки предметної області.

Розроблено та протестовано програмний застосунок, який автоматично завантажує дані певних акцій за певний період з електронного ресурсу, генерує випадкові портфелі та виконує їх оптимізацію шляхом максимізації коефіцієнту Шарпа та мінімізації волатильності портфелю. Склавши портфель інвестицій з чотирьох акцій, які торгуються на біржі, була розрахована дохідність та ризик портфеля з різними видами оптимізації. В застосунку реалізовано графічне відображення результатів оптимізації портфелів у вигляді таблиць та графіків. Перший графік демонструє зміни кожної акції протягом заданого періоду часу. Наступним є графік щоденної прибутковості замість фактичних цін, на якому можна побачити волатильність (мінливість) акцій. Графічно подається імітована оптимізація портфелю на основі ефективної межі - лінії, вздовж якої точки дадуть найменший ризик для цільової прибутковості та розрахована оптимізація портфелю на основі ефективної межі.

Побудовані програмою графіки та таблиці дозволяють користувачу краще оцінити створений портфель проекту енергозбереження.

Наукова новизна. Запропонований у роботі підхід є поєднанням методів оптимізації інвестиційного портфеля за портфельною теорією Марковіца та методів пошуку максимального коефіцієнта Шарпа та мінімальної волатильності в одному програмному застосунку для розв'язання широкого спектру завдань.

Практична цінність. Виконана розробка має значну практичну цінність, адже дозволяє швидко виконувати оптимізацію фінансового портфелю для будь-яких активів, що дає змогу в тому числі використовувати систему для оптимізації управління портфелями проектів енергозбереження на енергоємних підприємствах. Крім того, вона може стати основою або зразком для аналогічної розробки.

Ключові слова: інвестиційний портфель; модель Гаррі Марковіца; енергозбереження; енергоємні підприємства; теорія ризику.

I. ВСТУП

Розвиток промисловості є важливим елементом формування конкурентоспроможності України на європейському і світовому ринках.

Технологічні процеси в важкій промисловості (в тому числі на металургійних підприємствах) відрізняються підвищеною питомою витратою енергії, тому питанням енергозбереження та енергоефективності на енергоємних підприємствах надається особлива актуальність.

Загальна мета підвищення енергоефективності на підприємстві реалізується на основі управління портфелем енергозберігаючих проектів, які спрямовані на виконання таких завдань: оптимізація енергетичного балансу; мінімізація споживання природного газу; оптимізація енергоефективності та інше.

Споживання енергетичних ресурсів в більшості сфер діяльності залежить від цілого комплексу виробничих і технологічних факторів, тому для розроблення і прийняття технічно правильних і економічно обґрунтованих рішень необхідно встановлення зако-

номірностей формування енерговитрат у вигляді математичних моделей енергоспоживання, що враховують рівень і динаміку енергоспоживання. Особливо актуальна ця задача для енергоємних підприємств, режим роботи яких характеризується складною системою взаємопов'язаних, часто ймовірнісних заданих або нечітких факторів.

Вирішення задач енергозбереження неможливо без розроблення комплексної програми та портфеля проектів за основними напрямками енергозбереження з обов'язковою координацією їх з програмою розвитку основного виробництва. Гострота вирішення цих питань викликана необхідністю поліпшення економічної стабільності підприємств, підвищення конкурентоспроможності продукції та зменшення залежності від постачальників енергоресурсів.

Найважливішими завданнями при плануванні та управлінні електроспоживанням на енергоємному підприємстві є завдання нормування і прогнозування витрат електроенергії. Обґрунтовані норми споживання електроенергії дозволяють здійснювати прогноз електроспоживання для окремих підрозділів і підприємства в цілому, здійснювати контроль ефективності використання електричної енергії конкретним підрозділом (на конкретному агрегаті), а також визначати ділянки неефективного енергоспоживання [1] – [5].

Для промислових об'єктів в Україні в сучасних умовах існують суттєві проблеми, які пов'язані із фінансуванням енергозберігаючих заходів, вибором оптимальних способів вкладення коштів в інвестиційні проекти з підвищення енергоефективності, відсутністю інформаційних систем та недосконалістю організаційно-економічного механізму забезпечення енергозбереження на промислових підприємствах. Для запобігання фінансових втрат при формуванні сукупності енергозберігаючих заходів (портфелів проектів) потрібна розробка та вдосконалення методів оцінки ефективності програм енергозбереження, які враховують широкий вибір у використанні джерел інвестицій, призначених для їх реалізації [6].

Для вирішення задачі управління портфелями проектів енергозбереження на енергоємних підприємствах досить часто використовують методи оптимізації витрат на ці проекти, тому для розв'язання даної задачі доречно використовувати методи оптимізації інвестиційних портфелів, які влучно відображають специфіку та методику вирішення типових завдань.

Для алгоритму формування ефективних інвестиційних проектів необхідно розглядати дві задачі, пов'язані з реконструкцією: внутрішню задачу – реконструкцію власне розглянутого цеху; зовнішню задачу – реконструкцію всього технологічного ланцюжка, якій включає дану виробничу ланку (від початкових стадій технологічного процесу до випуску готової продукції). При вирішенні першої задачі пропонується варіант реконструкції повинен забезпечувати максимально можливе зниження витрат виробництва всередині

цеху, бути найменш капіталомістким, забезпечувати необхідне поліпшення якості, що дозволяє підвищити прибуток за рахунок доплати до ціни готової продукції [3].

Після такого узагальнення треба пам'ятати, що задача знаходиться в певній предметній області, виходячи з цього, треба залишатися в заданих предметною областю обмеженнях.

Таке переосмислення поставленої задачі та способу її вирішення дає можливість використовувати набагато ширше коло матеріалів для аналізу та розробки системи.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Формування інвестиційного портфеля пов'язані з підбором певної сукупності об'єктів інвестування реалізації інвестиційної діяльності.

Суть портфельного інвестування полягає у поліпшенні можливостей інвестування шляхом надання сукупності об'єктів інвестування тих інвестиційних якостей, які недосяжні з позиції окремо взятого об'єкта, а можливі лише за їх поєднанні.

Структура інвестиційного портфеля відбиває певне поєднання інтересів інвестора. Таким чином, інвестиційний портфель виступає як інструмент, за допомогою якого досягається необхідна дохідність за мінімального ризику та певної ліквідності.

Проблеми формування портфеля цінних паперів та його оцінки займають одне з провідних місць у сучасній економічній теорії та практиці, що зумовлено їх актуальністю в умовах розвиненого ринку.

В роботах Fotis та Polemis проведено дослідження у галузі сталого розвитку, екологічної політики, використання відновлюваних джерел енергії та визначені основні напрямки досліджень у галузі концепції та принципу організації енергозбереження виробництва [7]. В [8] розглянуто причинно-наслідкові зв'язки між енергоефективністю та технологічними інноваціями. Wiese та Baldini в [8] створили концептуальну модель промислового сектора в рамках моделі енергетичної системи. В [10] автори розглянули взаємодію між енергоспоживанням, економічним зростанням та екологічною стійкістю. Виявлено нові технологічні тенденції та політичні потреби в енергоефективних системах, що описано в [11]. Lin та Wang в [12] розглянули потенціал ізольованого розвитку енергоспоживання від економічного зростання. Trotta в [13] оцінив підвищення енергоефективності, енергетичну залежність та викиди вуглецю в Європейському Союзі.

Проте умови економіки неможливо повною мірою застосовувати загальні положення теорії портфельного інвестування і сформований у країнах арсенал інвестиційних стратегій.

У зв'язку з цим при визначенні основ формування фондового портфеля неминуче доводиться обме-

жуватися використанням лише тих аспектів портфельної теорії, які можуть бути певною мірою адаптовані до дійсності, і враховувати специфічні форми прояву різних факторів, що впливають на вибір цінних паперів для портфельного інвестування в економіку.

Щоб ефективно вести портфель інвестицій фінансовий менеджер має використовувати такі принципи, які широко застосовуються у світовій практиці для формування інвестиційного портфеля:

Успіх інвестицій в основному залежить від правильного розподілу коштів за типами активів на 94% вибором типу інвестиційних інструментів, що використовуються (акції великих компаній, короткострокові казначейські векселі, довгострокові облігації та ін.); на 4% вибором конкретних цінних паперів заданого типу, на 2% – оцінкою моменту закупівлі цінних паперів. Це тим, що папери одного типу сильно корелюють, тобто. якщо якась галузь зазнає спаду, то збиток інвестора не дуже залежить від того, переважають у його портфелі папери тієї чи іншої компанії.

Ризик інвестицій у певний тип цінних паперів визначається ймовірністю відхилення прибутку від очікуваного значення. Прогнозоване значення прибутку можна визначити на основі обробки статистичних даних про динаміку прибутку від інвестицій у ці папери в минулому, а ризик – як середньоквадратичне відхилення від очікуваного прибутку.

Загальна дохідність та ризик інвестиційного портфеля можуть змінюватись шляхом варіювання його структурою. Існують різні програми, що дозволяють конструювати бажану пропорцію активів різних типів, наприклад мінімізуючий ризик при заданому рівні очікуваного прибутку або максимізуючий прибуток при заданому рівні ризику та ін.

Оцінки, що використовуються при складанні інвестиційного портфеля, мають імовірнісний характер. Конструювання портфеля відповідно до вимог класичної теорії можливе лише за наявності низки чинників: ринку цінних паперів, що сформувався, певного періоду його функціонування, статистики ринку та ін.

Цілі формування інвестиційного портфеля значною мірою є альтернативними. Зростання ринкової вартості капіталу пов'язані з певним зниженням поточного доходу інвестиційного портфеля. Збільшення капітальної вартості та збільшення доходу ведуть до підвищення рівня інвестиційних ризиків. Завдання досягнення необхідної ліквідності може перешкоджати включенню до складу інвестиційного портфеля об'єктів, які забезпечують зростання капітальної вартості чи отримання високого доходу, але які, зазвичай, дуже низькою ліквідністю.

До ключових елементів та стратегій створення ефективного інвестиційного портфелю належать [6]:

- а) диверсифікація;
- б) ребалансування;
- в) активне управління портфелем;

г) пасивне управління портфелем.

Цінні папери – це грошові документи, що засвідчують право володіння або кредитні відносини, визначають взаємини між особою, яка їх випустила (емітентом), та їхнім власником і передбачають, як правило, виплату доходу у вигляді дивідендів чи відсотків, а також можливість передачі грошових прав іншим особам. Цінні папери можна використати для здійснення розрахунків між суб'єктами господарювання або як застава для забезпечення платежів і кредитів.

Акція – цінний папір без установленого строку обігу, що засвідчує пайову участь у статутному фонді акціонерного товариства, підтверджує членство в ньому і гарантує участь в управлінні ним, дає право його власникові на одержання частини прибутку у вигляді дивіденду, а також на участь у розподілі майна за ліквідації акціонерного товариства.

Облігації – термінові боргові зобов'язання з фіксованим процентом, за допомогою яких держава і муніципальні (місцеві) органи, а також підприємства мобілізують фінансові ресурси.

Портфельна теорія заснована на статистичних методах механізмів оптимізації інвестиційного портфеля за заданими критеріями зі співвідношенням рівня його прибутковості та ризику.

Мета аналізу цінних паперів протягом десятиліть залишилася, в основному, незмінною:

- а) визначення справжньої вартості цінних паперів;
- б) визначення ступеня ризику;
- в) прогнозування очікуваного прибутку за цінними паперами.

Але на кінець 50-х – початок 60-х років ХХ століття на основі трьох факторів почалися зміни у процесі аналізу, особливо звичайних акцій:

- а) наявність мікрокомп'ютерів, персональних комп'ютерів і комп'ютерних терміналів, пов'язаних через телефонну мережу з банком даних;
- б) величезні комп'ютерні банки інформації, приведені у відповідність із сучасними вимогами;
- в) використання сучасної теорії портфеля цінних паперів (МРТ – ModernPortfolioTheory) у формі моделей для вибору цінних паперів портфеля.

На основі можливостей певної регресивної моделі аналітик може передбачити або оцінити майбутні коефіцієнти для акцій, залишковий ризик, темп росту дивідендів і ставку дисконту для вибраних вкладником або менеджером акцій даної компанії. Такий аналіз дозволяє скласти різноманітний і вигідний портфель цінних паперів.

Сучасна теорія портфеля розглядає й урізноманітнення цінних паперів, але в основному подає оптимальні методи розміщення. Одним із найпростіших засобів сучасної теорії портфеля (СТП), є метод уріз-

номанітнення, який дозволяє інвестору зменшити до мінімуму ризик. Також СТП дозволяє інвесторам здійснити набір цінних паперів у портфелі з вищим доходом.

Припущення сучасної портфельної теорії – СТП припускає, що ринок є ефективний. Це означає, що всі учасники ринку мають доступ до інформації, одержують однакову інформацію, мають вільний доступ і вихід з ринку. Фундаментальний же припускає, що ринок є неефективним і більший дохід можна отримати, купуючи недооцінені цінні папери.

СТП припускає, що інвестори:

а) неохоче сприймають ризик, тобто не люблять його. Ризик визначається несталістю норми доходу або основного капіталу;

б) надають перевагу вищій нормі доходу над нижчою;

в) намагаються максимально збільшити доходи і до мінімуму зменшити ризик. Іншими словами, намагаються одержати найвищі доходи на одиницю ризику.

СТП припускає, що всі рішення будуть прийматися на основі очікуваної норми доходу та очікуваного ризику або очікуваного стандартного відхилення норми доходу.

СТП вимагає певного співвідношення цінних паперів у портфелі. Ця вимога була розроблена Гаррі Марковіцем. Він припустив, що, знаючи коефіцієнт кореляції, відношення однієї акції до іншої, можна визначити комбінацію фондів, яка забезпечить найнижчий ризик для даного рівня доходу [14].

СТП стверджує, щоб зменшити ризик, інвестор повинен додати інші цінні папери до свого портфеля. Іншими словами, ризик зменшується при збільшенні кількості цінних паперів у портфелі.

СТП припускає, що:

а) завданням інвестора є ефективний набір цінних паперів, який забезпечить найвищий дохід при найнижчому рівні ризику;

б) норма доходу і ризик за цінними паперами обчислюється за певний період часу;

в) ризикові цінні папери можуть додаватися, вилучатися з портфеля на будь-яку суму.

Основою СТП є гіпотеза ефективного ринку [15].

Таким чином, у країнах Заходу широко практикується розміщення коштів на фондовому ринку, оскільки це більш вигідно, аніж, наприклад, вкладання в нерухомість, що було популярним два десятиріччя тому. В Україні фондовий ринок почав активно розвиватися тільки з початком приватизації. Сьогодні фондовий ринок, певною мірою, вже сформувався, що дозволяє вести мову про вкладання коштів у цінні папери.

Кожний цінний папір характеризується доходністю та ризиком. Під ризиком розуміється ймовірність

неотримання очікуваного прибутку чи навіть часткову або повну втрату коштів, які вкладені в цінні папери. Ризик та доход різних цінних паперів різні. Як правило, цінні папери, яким не притаманний ризик, дають невеликий прибуток, а цінні папери, які можуть дати більший дохід, характеризуються більшим ризиком.

Ризик прийнято розділяти на ринковий, тобто єдиний для всіх цінних паперів, який неможливо уникнути, та індивідуальний – притаманний конкретному цінному паперу. Вкладаючи грошові кошти в різні цінні папери, формуючи портфель цінних паперів, можливо практично до нуля знизити індивідуальний ризик: якщо по одним цінним паперам буде низький дохід (збиток), то інші це компенсують. Чим більше цінних паперів знаходиться в портфелі, тобто чим більше він диверсифікований, тим менший індивідуальний ризик.

Кожне підприємство, яке бажає розмістити вільні кошти на фондовому ринку, має свою шкалу оцінки ризику та прибутку. Високий прибуток для одного підприємства може здатися низьким для іншого. Якщо одні надають перевагу ризику з низьким прибутком, то інші – погоджуються на великий ризик з очікуванням великого прибутку.

Метою оптимізації портфелю цінних паперів є формування такого портфелю цінних паперів, який би відповідав вимогам підприємств як за прибутками, так і за ризиком, та при цьому достатньою мірою був диверсифікований [16].

Для кожного підприємства або фізичної особи оптимальним звичайно був би варіант, коли досягається максимальний ефект у вигляді прибутку від вкладання коштів у цінні папери, і в той же час ризик отримання збитку зводиться до нуля. Але така ситуація є недосяжною за ринкових умов, тому слід мати на увазі певні обмеження щодо ризику або прибутковості.

Перший варіант – задатися певною максимально допустимою величиною ризику. Тоді задача оптимізації зводиться до вибору такої структури портфеля, при якій ризик портфеля не перевищує заданого значення, а доходність портфеля є максимальною. Така задача називається прямою задачею.

Другий варіант – задатися певною мінімально допустимою величиною доходності. У цьому випадку задача оптимізації зводиться до вибору такої структури портфеля, прибутку якого вищий або ж дорівнює заданому значенню, а ризик мінімальний. Така задача називається оберненою.

Розв'язавши пряму і обернену задачі з оптимізації портфеля з N цінних паперів підприємство отримує дані – скільки та які цінні папери необхідно придбати, щоб сформувати портфель, який по міркам конкретного підприємства має достатньо високу доходність при допустимому ризику.

При спробі розв'язати пряму або обернену задачу

виникає запитання: яким чином визначаються характеристики портфеля (доходність та ризик). На сьогоднішній день найбільш розповсюджені 2 моделі визначення характеристик портфеля: модель Марковіца та модель Шарпа. Обидві моделі створені і успішно працюють в умовах, що склалися у відносно стабільних західних фондових ринках. Нажаль, до їх числа український фондовий ринок поки що не входить. Через це була розпочата спроба створити модель, яка здатна успішно функціонувати в умовах фондового ринку, що формується, розвивається та реорганізується, яким є фондовий ринок України. Створена модель отримала назву Квазі-Шарп (подібна до моделі Шарпа).

Поряд із названими загальними, універсальними прийомами аналізу портфеля цінних паперів використовуються й евристичні прийоми, які ґрунтуються на інтуїції та досвіді дослідників.

До евристичних прийомів, або методів активізації творчості, нестандартного мислення відносять зазвичай низку методів генерації варіантів розв'язання проблеми на основі притаманної людині здатності до творчої діяльності. Їх застосовують тоді, коли звичайні рутинні методи, засновані на аналізі минулого досвіду та теперішніх умов, не дають змоги вибрати спосіб вирішення. Особливо широко ці прийоми використовують у стратегічному аналізі для прогнозування розвитку економічної ситуації.

Усі евристичні методи поділяються на дві великі групи – методи ненаправленого пошуку («мозкового штурму», «експертних оцінок», «колективного блокування», «контрольних питань», «асоціацій та аналогій», ділові ігри та ситуації, кібернетичні наради) та методи направленого пошуку (морфологічний метод, алгоритм розв'язання винахідницьких задач, метод «сходження на гору», метод Монте-Карло тощо) [15].

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи – дослідити методи прийняття рішень при управлінні портфелями проектів, а також виконати їх програмну реалізацію в складі системи оптимізації управління портфелями проектів енергозбереження на енергоємних підприємствах.

Для досягнення мети було поставлено наступні задачі:

- дослідити основні сучасні тенденції та перспективи розвитку теорії прийняття рішень;
- дослідити основні методи, алгоритми та пакети прикладних програм задач прийняття рішень;
- застосувати ці методи та алгоритми при розробці прикладного програмного забезпечення проблемно-орієнтованого обчислювального комплексу.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Вхідною інформацією до роботи – є таблиця з

щоденною скоригованою ціною закриття кожної акції з 01.11.2013 до 01.11.2021 (дані про ціни за 8 років). Дані були взяті з ресурсу finance.yahoo.com [17] за допомогою бібліотеки Python «pandas_datareader» [18].

Для прикладу було обрано дані акцій компаній зі сфери «Біотехнологія та ліки»:

- а) Johnson&Johnson (JNJ);
- б) RocheHolding AG (RHHBY);
- в) PfizerInc. (PFE);
- г) Genmab A/S (GMAB).

На рис.1 зображена таблиця з даними, в якій стовпчики – це задана компанія, а рядки – це щоденна ціна на акції обраних компаній.

Розглянемо генерацію випадкових портфелів. Візьмемо, що у портфелі буде, наприклад, чотири акції. Першим кроком є розподілення бюджету по кожній акції у портфелі. Якщо загальний бюджет дорівнює 1,

Date	JNJ	RHHBY	PFE	GMAB
2013-11-01	75.172951	26.859592	21.890137	4.412000
2013-11-04	74.899239	27.006538	21.953339	4.412000
2013-11-05	74.722092	26.619841	21.939295	4.412000
2013-11-06	74.907257	26.789988	21.918066	4.366000
2013-11-07	74.625473	26.364628	21.875601	4.366000
...
2021-10-26	165.750000	48.529999	43.180965	45.660000
2021-10-27	163.740005	48.040001	42.596100	45.200001
2021-10-28	162.850006	48.750000	42.804272	44.430000
2021-10-29	162.880005	48.330002	43.359402	44.639999
2021-11-01	163.020004	49.340000	43.260269	44.770000

[2014 rows x 4 columns]

Рисунок 1.Щоденна ціна на акції обраних компаній

то можна визначити ваги для кожної акції, так що сума ваг дорівнюватиме 1. І значення ваги буде частиною бюджету, яку виділяється на певну акцію. Наприклад, якщо вага для PfizerInc. дорівнює 0,5, це означає, що виділяється для PfizerInc. 50% бюджету.

Розглянемо деякі функції для моделювання випадкових ваг кожної акції у портфелі, а потім розрахуємо загальну річну доходність портфеля та річну волатильність.

Функція «portfolio_annualised_performance» буде розраховувати прибутковість та волатильність, і щоб зробити це як розрахунок у річному обчисленні, беремо до уваги 252 як кількість торгових днів на рік. Функція «gandom_portfolios» буде генерувати портфелі з випадковими вагами, призначеними для кожної акції, і, задавши аргумент «num_portfolios», визначаємо скільки випадкових портфелів буде згенеровано. Візьмемо за кількість портфелів число 30000.

Розглянемо стандартне відхилення портфеля. Першим кроком у функції «portfolio_annualised_performance» – є розрахунок волатильності портфеля. Формула стандартного відхилення портфеля виглядає наступним чином:

$$\sigma_{portfolio} = \sqrt{w_1^2 \sigma_1^2 + w_2^2 \sigma_2^2 + 2w_1 w_2 Cov_{1,2}}$$

Цю формулу можна спростити, якщо використувати матричні позначення:

$$\sigma_p^2 = [w_1 w_2] \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{1,2} \\ \sigma_{1,2} & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = [w_1 \sigma_1^2 + w_2 \sigma_{2,1} w_1 \sigma_{1,2} + w_2 \sigma_2^2] \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = w_1^2 \sigma_1^2 + w_1 w_2 \sigma_{2,1} + w_1 w_2 \sigma_{1,2} + w_2^2 \sigma_2^2$$

За допомогою наведеного вище обчислення матриці отримуємо частину квадратного кореня у вихідній формулі. Тепер все, що потрібно зробити, це помістити її у квадратний корінь. Як і у випадку з прибутковістю в річному обчисленні, візьмемо 252 торгові дні (у цьому випадку квадратний корінь з 252), щоб розрахувати середньорічне стандартне відхилення портфеля.

Другим кроком – є обчислення коефіцієнту Шарпа. Щоб зрозуміти коефіцієнт Шарпа, важливо розуміти ширшу концепцію прибутковості із поправкою на ризик. Прибутковість із поправкою на ризик уточнює прибутковість інвестицій, вимірюючи, який ризик пов'язаний з отриманням цього прибутку, який зазвичай виражається у вигляді числа чи рейтингу. Може існувати ряд різних методів вираження прибутковості з поправкою на ризик і коефіцієнт Шарпа є одним з них [19].

Коефіцієнт визначає, скільки надлишкового прибутку отримується за додаткову волатильність, яка відчувається при володінні більш ризикованим активом.

Тепер отримаємо необхідні значення аргументів для функцій у «calc_vars». Для отримання щоденного прибутку, використовується функція pct_change до вхідної таблиці даних. Для знаходження середньої добової прибутковості використовується функція mean до попередньої змінної. Для коваріаційної матриці прибутковості – функція cov до змінної щоденного прибутку. Згенеруємо 30000 випадкових портфельів. Безризикова ставка була взята з Міністерства фінансів США. Ставка 0.15% – це ставка казначейських векселів за 52 тижні на кінець 2021 року. Обґрунтування цього полягає в тому, що історичні дані про ціни належать до 2013–2021 років, і зважаючи на те, що аналіз виконується в кінці 2021 року, оновлена ставка за казначейськими векселями – на кінець 2021 року. Було обрано 52-тижневі ставки за казначейськими векселями, щоб вони відповідали річній прибутковості та ризику, які розраховуються.

Функція «display_simulated_efficient_frontier_with_random» генерує випадковий портфель і отримує результати (прибутковість портфеля, волатильність портфеля, коефіцієнт Шарпа портфеля) та ваги для відповідного результату.

Знаходження ефективного кордону можливо реалізувати за допомогою оптимізації Scipy. Функція

оптимізації Scipy схожа на функцію "вирішувач" в Excel та виконує аналогічне завдання, коли задається те, що потрібно оптимізувати, а також які обмеження та межі.

У функції оптимізації Scipy немає «максимізації», тому як цільову функцію потрібно передати те, що слід мінімізувати. Саме тому «neg_sharpe_ratio» обчислює негативний коефіцієнт Шарпа. Тепер можна використовувати це як цільову функцію для мінімізації. У функції «max_sharpe_ratio» спочатку визначаються аргументи (сюди не повинні входити ваги).

Вищезгадане обмеження говорить, що сума всіх ваг має дорівнювати 1. Не можна виділити в цілому понад 100% бюджету. З цього випливає ще межа для присвоєння випадкових ваг – будь-яка вага має бути включно між 0 і 1. Не можна вказати негативний розподіл бюджету на акцію або більше 100% розподілу на акцію.

Також можна визначити оптимізацію для розрахунку портфеля з мінімальною волатильністю. Для цього потрібно мінімізувати цільову функцію, пробуваючи різні ваги з вище описаними обмеженнями.

Ще можна намалювати лінію, яка показує, де мають бути ефективні портфелі для цієї ставки ризику. Це називається ефективний кордон. Функція «effective_return» обчислює найбільш ефективний портфель для заданої цільової доходності, а функція «effective_frontier» братиме діапазон цільового прибутку і обчислюватиме ефективний портфель для кожного рівня доходності.

На початку роботи програми користувачу представляється графік, який зображений на рис. 2. На ньому видно як ціна кожної акції змінювалася протягом заданого періоду часу.

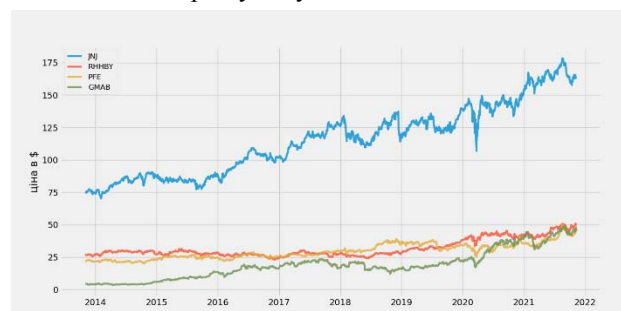


Рисунок 2. Графік змін цін акцій

За графіком видно, що ціна на акції компанії Johnson&Johnson найвища, серед усіх. Компанія Roche Holding AG у 2016-2017 роках поступилася другим місцем компанії Pfizer Inc, але в середині 2019 року значно подорожчала та змістила Roche Holding AG з другого місця. А компанія Genmab A/S була найдешевшою до середини 2020 року, але потім ціна на її акції стала схожою на компанію Pfizer Inc.

Наступним графіком – є щоденна доходність (відсоткова зміна порівняно з попереднім днем). На

рис. 3 зображений графік щоденної прибутковості замість фактичних цін, на якому можна побачити волатильність (мінливість) акцій.

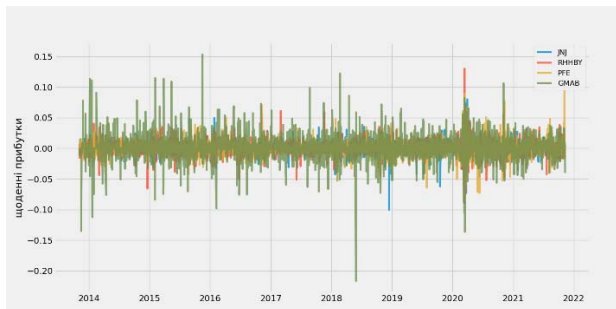


Рисунок 3. Щоденна дохідність

На графіку виділяється компанія Genmab A/S, у якої багато позитивних сплесків і багато негативних, один, навіть, дуже негативний. RocheHolding AG має найвищий позитивний сплеск, після попередньої компанії. У PfizerInc найбільший позитивний сплеск на третьому місці серед всіх. А у компанії Johnson&Johnson наявні урівноважені сплески. З графіку можна зробити висновок, що Johnson&Johnson найстабільніша серед всіх, а Genmab A/S – найбільш ризикована.

Далі згенерувавши випадковий портфель і отримавши прибутковість портфеля, волатильність портфеля, коефіцієнт Шарпа портфеля та ваги, отримуємо данні, представлені на рис. 4 та графік – на рис. 5.

На рис. 4 можна побачити, як розподіляється бюджет всередині згенерованих портфелів з максимальним розподілом за коефіцієнтом Шарпа та за мінімальним розподілом волатильності.

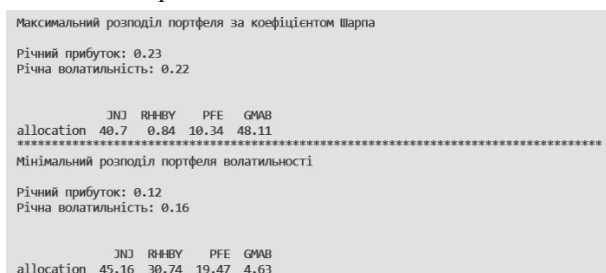


Рисунок 4. Максимальній та мінімальний розподіл

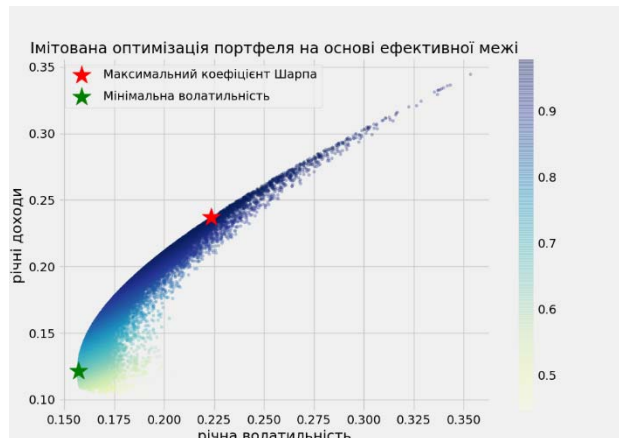


Рисунок 5. Імітована оптимізація портфеля на основі ефективної межі

Для портфеля з мінімальним ризиком ми бачимо, що майже половина бюджету виділяється на Johnson&Johnson. Якщо ще раз звернутися до графіку щоденної прибутковості (рис. 3), представлений раніше, бачимо, що Johnson&Johnson – найменш волатильна акція з чотирьох, тому виділення Johnson&Johnson великого відсотка для портфеля з мінімальним ризиком має інтуїтивний сенс.

А для портфелю з більшим ризиком та вищою прибутковістю, найкращу прибутковість із виправленням на ризик дає той, який має максимальний коефіцієнт Шарпа. У цьому сценарії ми виділяємо значну частину Johnson&Johnson та Genmab A/S та найменшу – RocheHolding AG.

За графіком на рис. 5 видно, що програма, знайшовши портфель із найвищим коефіцієнтом Шарпа, відображає портфель із максимальним коефіцієнтом Шарпа у вигляді червоної зірочки. І робить аналогічні кроки для портфеля з мінімальною волатильністю та відображає його зеленою зіркою на графіку. Усі випадково згенеровані портфелі нанесені на карту із застосуванням до них колірної картки на основі коефіцієнта Шарпа. Чим більш синій колір, тим вищий коефіцієнт Шарпа.

На графіку випадково змодельованих портфелів бачимо, що він утворює форму дуги поверх згрупованих синіх крапок. Ця лінія називається ефективним кордоном, тому що точки вздовж лінії дають найменший ризик для цільової прибутковості. Всі інші точки праворуч від лінії дають більш високий ризик за тієї ж прибутковості. Якщо очікувана прибутковість така сама, навіщо додатковий ризик, коли є варіант із меншим ризиком.

На цьому етапі отримано два види оптимального портфеля, описані вище, шляхом моделювання безлічі можливих випадкових та вибору найкращих (або з мінімальним ризиком, або з максимальною прибутковістю з поправкою на ризик) портфелів.

Наступним кроком роботи програми є зображення варіантів портфелів з максимальним коефіцієнтом

Шарпа і мінімальною волатильністю з усіма випадково згенерованими портфелями, але цього разу не вибираються оптимальні із випадково згенерованих портфелів, а фактично обчислюються за допомогою функції Scipy "мінімізувати". Та будується ефективна лінія межі. Результати зображені на рис. 6 та 7.

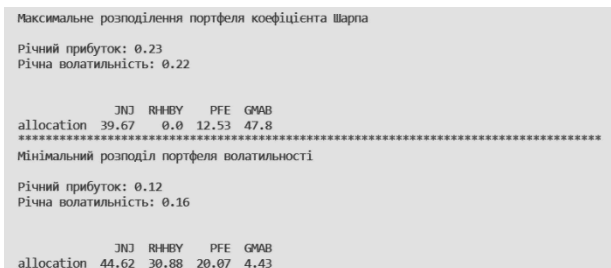


Рисунок 6. Максимальний та мінімальний розподіл

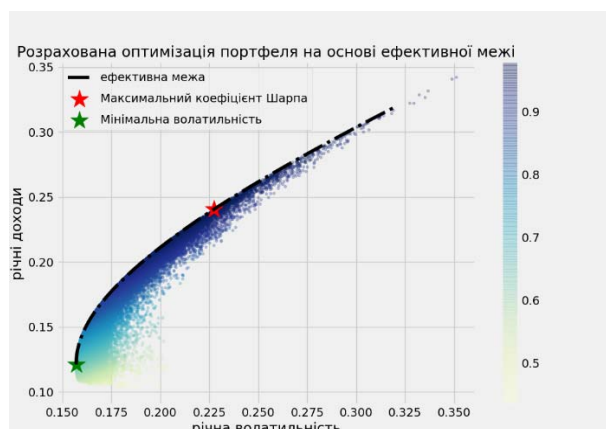


Рисунок 7. Розрахована оптимізація портфеля на основі ефективної межі

Маємо майже той самий результат, що при моделюванні з випадково згенерованими портфелями. Невелика відмінність полягає в тому, що функція «оптимізації» Scipy взагалі не виділяла будь-який бюджет для RocheHolding AG у портфелі з максимальним коефіцієнтом Шарпа, тоді як той, який вибрався із випадково згенерованих вибірок, має 0,84% розподілу для RocheHolding AG.

Замість того, щоб будувати кожен випадково згенерований портфель, можна нанести на графік кожен окрему акцію з відповідними значеннями річної прибутковості та річного ризику кожної акції. Таким чином, можна побачити та порівняти, як диверсифікація знижує ризик за рахунок оптимізації розподілу.

Як видно з наведеної вище таблиці на рис. 8 та графіку на рис. 9, найменший ризик у акцій Johnson&Johnson і становить близько 0,18. Але з оптимізацією портфеля можна досягти ще меншого ризику при 0,16 і все ж таки з більш високою прибутковістю, ніж у Johnson&Johnson. І якщо є готовність взяти трохи більший ризик приблизно на такому ж рівні ризику, як у RocheHolding AG чи PfizerInc, мож-

на досягти вищої прибутковості – 0,23 з оптимізацією портфеля, проти 0,21.

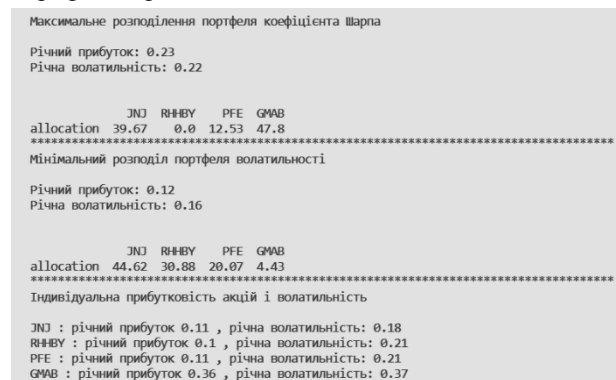


Рисунок 8. Максимальний, мінімальний розподіл та індивідуальні показники

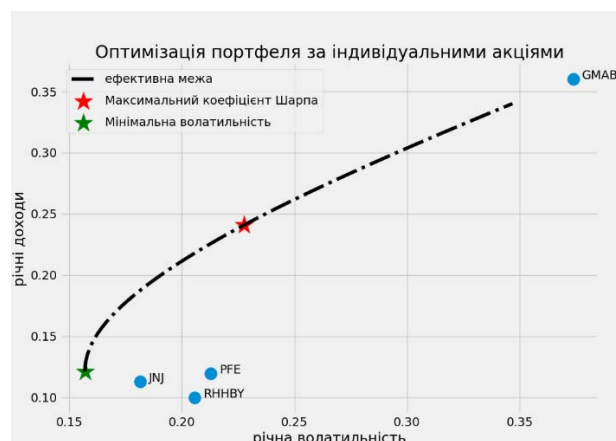


Рисунок 9. Оптимізація портфеля за індивідуальними акціями

V. ВИСНОВКИ

Було виконано програмну реалізацію системи оптимізації фінансового портфелю для будь-яких активів, що дає змогу в тому числі використовувати розроблену систему для оптимізації управління портфелями проектів енергозбереження на енергоємних підприємствах.

Програма була розроблена на мові програмування Python, яка завантажує дані про щоденну скориговану ціну закриття акцій компаній зі сфери «Біотехнологія та ліки» за певний період часу та використовує їх для аналізу, генерації та оптимізації портфелів, шляхом максимізації коефіцієнту Шарпа та мінімізації волатильності. Результатами роботи програми є дані про відсотковий розподіл бюджету серед компаній за вищенаведеними способами оптимізації, інформація про індивідуальну прибутковість акцій та волатильність, а також наглядні графіки.

Склавши портфель інвестицій з чотирьох акцій, які торгуються на біржі, була розрахована дохідність та ризик портфеля з різними видами оптимізації. Прибутковість портфеля за максимальним розподі-

ленням Шарпа становила 0.23%, ризик портфеля – 0.22%, а за мінімальним розподілом волатильності, прибутковість – 0.12%, ризик портфеля – 0.16%. І кожен вирішує яким чином інвестувати – з максимальною дохідністю, але з високим рівнем ризику, чи краще з низькою дохідністю, але з мінімальним ризиком.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кійко, С. Г. Методологія предиктивної адаптації управління портфелями проектів енергозбереження на металургійних підприємствах : дис. ... д. техн. наук : 05.13.22 / Кійко Сергій Генадійович. – Запоріжжя, 2021. – 420 с.
- [2] Дубровін В.І. Керування процесами енергозбереження на металургійних підприємствах/В.І. Дубровін, О.І. Юськів // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2019. - №2(69).– Частина 2. - С 61-68.
- [3] Дубровін В.І. Управління портфелями проектів енергозбереження на металургійних підприємствах / В.І. Дубровін, О.І. Юськів// Радіоелектроніка та інформатика. – 2019. - №2.- С 43-46.
- [4] Дубровін В.І. Структура інформаційної технології управління портфелями проектів енергозбереження на металургійних підприємствах / В.І. Дубровін, О.І. Юськів// Електротехніка и електроенергетика. - 2019 - №4. – С. 46-55..
- [5] Дубровін В.І. Енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності виробництва на металургійних підприємствах / В.І. Дубровін, О.І. Юськів // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.-2019 р.-№ 1.-С 93-97.
- [6] Управління портфелями проектів енергозбереження на основі теорії Марковіца / С.Г.Кійко, Л.Ю.Дейнега, М.І.Басанець, Д.В.Каменський, А.Є. Діденко // Інтегровані технології та енергозбереження. -2021. №3. С. 79-91.
- [7] Fotis, P. Sustainable development, environmental policy and renewable energy use: A dynamic panel data approach / P.Fotis, M.Polemis // Sustainable Development. –2018. - №26(6). –P. 726-740.
- [8] Irandoust, M. On the causality between energy efficiency and technological innovations: Limitations and implications / M. Irandoust// International Journal of Green Energy. – 2019. -№16(15). –P.1665-1675.
- [9] Wiese, F. Conceptual model of the industry sector in an energy system model: A case study for Denmark / F. Wiese, M. Baldini // Journal of Cleaner Production. –2018. - №203. –P. 427-443.
- [10] Akadiri, S.S. Contemporaneous interaction between energy consumption, economic growth and environmental sustainability in South Africa: What drives what? / S.S.Akadiri, F.Bekun, S.A. Sarkodie // Science of the Total Environment. – 2019. - №686. -P. 468-475.
- [11] New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems-a major opportunity for energy and carbon savings /A.De Almeida, J. Fong, C.U. Brunner, R. Werle, M.Van Werkhoven // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. -№115. - P. 109384.
- [12] Lin, B. Possibilities of decoupling for China's energy consumption from economic growth: A temporal-spatial analysis / B. Lin, M. Wan // Energy. –2019. - №185. –P. 951-960.
- [13] Trotta, G. Assessing energy efficiency improvements, energy dependence, and CO2 emissions in the European union using a decomposition method / G. Trotta // Energy Efficiency. –2019. -№12(7). –P. 1873-1890.
- [14] Markowitz Theory of Portfolio Management | Financial Economics [Electronic resource]. – Access mode <https://www.economicdiscussion.net/portfolio-management/markowitz-theory-of-portfolio-management-financial-economics/29748>.
- [15] Савчук, В.П. Оптимізація фондового портфелю [Електрон. ресурс] / В.П. Савчук. – Режим доступу: <http://www.management.com.ua/finance/fin013.html>.
- [16] Чумаченко, М.Г. Економічний аналіз [Електрон. ресурс] / М.Г. Чумаченко. – Режим доступу: <http://ebk.net.ua/Book/BookEkAnaliz/part3.5.html>.
- [17] Yahoo Finance - Stock Market Live, Quotes, Business & Finance News [Electronic resource]. – Access mode: <https://finance.yahoo.com/>.
- [18] Pandas-datareader [Electronic resource]. – Access mode: <https://pandasdatareader.readthedocs.io/en/latest/>.
- [19] Performance Evaluation of Two Optimal Portfolios by Sharpe's Ratio [Electronic resource]. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/228671028_Performance_Evaluation_of_Two_Optimal_Portfolios_by_Sharpe's_Ratio.

Стаття надійшла до редакції 01.05.2022

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ЭНЕРГОЕМКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

ДУБРОВИН В.И. канд. техн. наук, профессор, професор кафедры программных средств Национального университета "Запорожская политехника", Запорожье, Украина, e-mail: vdubrovin@gmail.com;

- ДЕЙНЕГА Л.Ю. старший преподаватель кафедры программных средств Национального университета "Запорожская политехника", Запорожье, Украина, e-mail: deynega.larisa@gmail.com;
- ЛАКТИОНОВ В.В. Студент кафедры программных средств Национального университета "Запорожская политехника", Запорожье, Украина, e-mail: wyknaite@gmail.com;

Цель работы. Исследовать методы принятия решений при управлении портфелями проектов, а также выполнить их программную реализацию в составе системы оптимизации управления портфелями проектов энергосбережения на энергоёмких предприятиях.

Методы исследования. Для реализации поставленной цели была выбрана портфельная теория Марковица – теория финансовых инвестиций, в рамках которой с помощью методов оптимизации осуществляется максимально выгодно-распределение риска портфеля ценных бумаг и оценка дохода. В сочетании с портфельной теорией были использованы методы поиска максимального коэффициента Шарпа и минимальной волатильности по данным случайно сгенерированных портфелей

Полученные результаты. Методы управления портфелями проектов энергосбережения рассмотрены через их обобщение к методам оптимизации инвестиционных портфелей, но с учетом специфики предметной области.

Разработано и протестировано программное приложение, которое автоматически загружает данные определенных акций за определенный период с электронного ресурса, генерирует случайные портфели и выполняет оптимизацию путем максимизации коэффициента Шарпа и минимизации волатильности портфеля. Составив портфель инвестиций по четырем акциям, торгуемым на бирже, была рассчитана доходность и риск портфеля с разными видами оптимизации. В приложении реализовано графическое отображение результатов оптимизации портфелей в виде таблиц и графиков. Первый график показывает изменения каждой акции в течении заданного периода времени. Следующим является график ежедневной доходности вместо фактических цен, на котором можно увидеть волатильность (изменчивость) акций. Графически представляется минимизация оптимизации портфеля на основе эффективного предела – линии, вдоль которой точки дадут наименьший риск для целевой доходности и рассчитанная оптимизация портфеля на основе эффективной границы.

Построенные программой графики и таблицы позволяют пользователю лучше оценить портфель проекта энергосбережения.

Научная новизна. Предложенный в работе подход является сочетанием методов оптимизации инвестиционного портфеля по портфельной теории Марковица и методов поиска максимального коэффициента Шарпа и минимальной волатильности в одном программном приложении для решения широкого спектра задач.

Практическая ценность. Выполненная разработка имеет значительную практическую ценность, т.к. позволяет быстро выполнять оптимизацию финансового портфеля для любых активов, что дает возможность использовать систему для оптимизации управления портфелями проектов энергосбережения на энергоёмких предприятиях. Кроме того, она может стать основой для аналогичной разработки.

Ключевые слова: инвестиционный портфель; модель Гарри Марковица; энергосбережение; энергоёмкие предприятия; теория риска.

ENERGY SAVING AT ENERGY-INTENSIVE ENTERPRISES

- DUBROVIN V.I. Ph.D, Professor, Software Tools Department, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vdubrovin@gmail.com;
- DEINEHA L.Y. Senior lecturer, Software Tools Department, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: deynega.larisa@gmail.com;
- LAKTIONOV V.V. Student, Software Tools Department, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: wyknaite@gmail.com;

Purpose. Investigate the methods of decision-making in the project portfolio management, as well as perform their software implementation as part of the system of the portfolio management optimization of energy saving projects at energy-intensive enterprises.

Methodology. To achieve this goal, Markovitz's portfolio theory was chosen - the theory of financial investment, in which the methods of optimization are the most profitable distribution of the risk of the securities portfolio and income valuation. In combination with portfolio theory, methods were used to find the maximum Sharpe coefficient and minimum volatility according to randomly generated portfolios.

Findings. Methods of portfolio management of energy saving projects are considered through their generalization to the methods of optimization of investment portfolios, but taking into account the specifics of the subject area.

A software application has been developed and tested that automatically downloads data for certain stocks for a certain period from an electronic resource, generates random portfolios and optimizes them by maximizing the Sharpe ratio and minimizing portfolio volatility. Composing a portfolio of investments from four stocks traded on the stock

exchange, the return and risk of the portfolio with different types of optimization were calculated. The application implements graphical display of portfolio optimization results in the form of tables and graphs. The first graph shows the changes in each stock over a given period of time. The following is a graph of daily profitability instead of actual prices, where you can see the volatility of shares. The simulated portfolio optimization based on the effective limit is graphically presented - the line along which the points will give the least risk to the target return and the calculated optimization of the portfolio based on the effective limit.

The graphs and tables built by the program allow the user to better assess the created portfolio of the energy saving project.

Originality. The approach proposed in this paper is a combination of methods for optimizing the investment portfolio according to Markovitz's portfolio theory and methods for finding the maximum Sharpe coefficient and minimum volatility in one software application to solve a wide range of problems.

Practical value. The completed development has significant practical value, as it allows you to optimize quickly the financial portfolio for any assets, which allows, among other things, to use the system to optimize the management of portfolios of energy saving projects in energy-intensive enterprises. In addition, it can be the basis or model for a similar development.

Keywords: investment portfolio; Harry Markovic model; energysaving; energy-intensive enterprises; risk theory.

REFERENCES

- [1] Kiiko, S. H. (2021) Metodolohi iapredykty vnoiadaptatsiiupravlinniaport feliamyproektivenerhozberezhennianametalurhiinykhpriemstvakh :dys. ... d. tekhn. nauk : 05.13.22.Zaporizhzhia, 420.(inUkrainian)
- [2] Dubrovin, B.I., Yuskiv, O.I. (2019) Keruvanniaprotsiamyenerhozberezhennianametalurhiinykhpriemstvakh. *VisnykKhersonskohonatsionalnohotekhnichnohouniversytetu*,2(69), p. 2, 61-68.(inUkrainian)
- [3] DubrovinV.I., YuskivO.I. (2019) Upravlinniaport feliamyproektivenerhozberezhennianametalurhiinykhpriemstvakh. *Radioelektronikainformatyka*, 2, 43-46.(inUkrainian)
- [4] Dubrovin, V.I., Yuskiv, O.I. (2019) Strukturainformatsiinoite khnolohiiupravlinnia portf eliamypr oektivenerhozberezhennianametalurhiinykhpriemstvakhElektrotekhnika ta elektroenerhetyka, 4, 46-55.(inUkrainian)
- [5] Dubrovin, V.I.,Yuskiv, O.I. (2019) Enerhozberezhennia ta pidvyshche nniaenerhetychnoiefektyvnosti vyrobnytstvanametalurhiinykhpriemstvakh. *Novimaterialyitekhnolohiivmetalurhiitamashynobuduvanni*, 1, 93-97.(inUkrainian)
- [6] Kiiko S.H., Deineha L.Y., Basanets M.I., Kamienskyi D.V., Didenko A.Ie. (2021) Upravlinnia portfeliamy proektivene rhozberezhennianaosnoviteorii Markovitsa. *Intehrovanitekhnolohiitaenerhozberezhennia*,3, 79-91.(inUkrainian)
- [7] Fotis, P., Polemis, M. (2018), Sustainable development, environmental policy and renewable energy use: A dynamic panel data approach. *Sustainable Development*, 26(6), 726-740.
- [8] Irandoust, M. (2019), On the causality between energy efficiency and technological innovations: Limitations and implications. *International Journal of Green Energy*, 16(15), 1665-1675.
- [9] Wiese, F., Baldini, M. (2018), Conceptual model of the industry sector in an energy system model: A case study for Denmark. *Journal of Cleaner Production*, 203, 427-443.
- [10]Akadiri, S.S., Bekun, F., Sarkodie, S.A. (2019), Contemporaneous interaction between energy consumption, economic growth and environmental sustainability in South Africa: What drives what? *Science of the Total Environment*, 686, 468-475.
- [11]De Almeida, A., Fong, J., Brunner, C.U., Werle, R., Van Werkhoven, M. (2019), New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems-a major opportunity for energy and carbon savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109384.
- [12]Lin, B., Wang, M. (2019), Possibilities of decoupling for China's energy consumption from economic growth: A temporal-spatial analysis. *Energy*, 185, 951-960.
- [13]Trotta, G. (2019), Assessing energy efficiency improvements, energy dependence, and CO2 emissions in the European union using a decomposition method. *Energy Efficiency*, 12(7), 1873-1890.
- [14]Markowitz Theory of Portfolio Management | Financial Economics [Electronic resource]. – Access mode <https://www.economicsdiscussion.net/portfolio-management/markowitz-theory-of-portfolio-management-financial-economics/29748>.
- [15]Savchuk V.P. Optymizatsiiafondovohoportfeliiu[Electronic resource]. – Access mode:<http://www.management.com.ua/finance/fin013.html>.(inUkrainian)
- [16]Chumachenko M.H. Economic analysis [Electronic resource]. – Access mode: <http://ebk.net.ua/Book/BookEkAnaliz/part3.5.html>. (inUkrainian)
- [17]Yahoo Finance - Stock Market Live, Quotes, Business & Finance News [Electronic resource]. – Access mode: <https://finance.yahoo.com/>.
- [18]Pandas-datareader [Electronic resource]. – Access mode:<https://pandasdatareader.readthedocs.io/en/latest/>.
- [19]Performance Evaluation of Two Optimal Portfolios by Sharpe's Ratio [Electronic resource]. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/228671028_Performance_Evaluation_of_Two_Optimal_Portfolios_by_Sharpe's_Ratio.