

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"



Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№4'2022

*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.

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ
КОЛЕГІЇ

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

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

Журнал включено до міжнародних наукометричних баз, каталогів та систем пошуку: Index Copernicus, CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Resource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; 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: rrvv@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 №3 від 28.11.2022 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 2,56. Тираж 300 прим. Зам. №876.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№4'2022

Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2022

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

Yunus Biçen, Ph.D. Duzce University, Turkey;
Prof. Jerzy Zgraja, Ph.D., Lodz University of
Technology, Lodz, Poland;
Prof. Oszkár Bíró, Ph.D., Technical University of Graz,
Graz, Austria;
Zurek, Stan, Ph.D., Research Associate, Cardiff
University, Cardiff, United Kingdom;
Sebastian Tomy, Ph.D, Toronto University, Canada,
(Technical Expert, Motor Drives and Control Group, Bay
City, Michigan, USA);
Arturi Cesare Mario, PhD., Prof., Polytechnic
University of Milan, Italy;
Carlos Roncero-Clemente, Ph.D., Prof., Universidad de
Extremadura, Badajoz, Spain;
José Roberto Camacho PhD, Prof., Universidade
Federal de Uberlandia, 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.
Zhytsov**, Sc.D., prof., National University of Life and
Environmental Sciences of Ukraine; **Ya. S. Paranchuk**, Sc.D., prof.,
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **O. I.
Tolochko**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical
University, Kiev, Ukraine; **V. V. Busher**, Sc.D., prof., Odesa
National Polytechnic University, Odesa, Ukraine; **P. D. Andrienko**,
Sc.D., prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University,
Zaporizhzhia, Ukraine; **V.V. Zinovkin**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia
Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **Yu I.
Moroz**, Ph.D., assoc. prof., Oles Honchar Dnipro National
University, Dnipro, Ukraine; **I. M. Kotsur**, Ph.D, assoc. prof.,
Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia,
Ukraine; **S. T. Yarymbash**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia
Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **G. M.
Shilo**, Sci.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National
University, Zaporizhzhia, Ukraine; **N. I. Furmanova**, Ph.D., assoc.
prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia,
Ukraine; **A. V. Parkhomenko**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia
Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. V.
Shcherbovskykh**, Sc.D., assoc. prof., Lviv Polytechnic National
University, Lviv, Ukraine; **V. V. Martynyuk**, Sc.D., prof.,
Khmelnitsky National University, Khmelnytsky, Ukraine; **V. V.
Kochan**, Ph.D., assoc. prof., Ternopil National Economic
University, Ternopil, Ukraine; **L. S. Globa**, Sc.D. prof., Kyiv
Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine; **M. A.
Skulish**, Ph.D., assoc. prof., Kyiv Polytechnic National Technical
University, Kyiv, Ukraine; **O.S. Nazarova**, Ph.D., assoc. prof.,
Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia,
Ukraine; **Yu.S. Bezverkhnia**, Ph.D., Senior Lecturer, Zaporizhzhia
Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

The journal included in the international scientometric databases, catalogs and search systems: Index Copernicus; CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Google Academy; OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Recourse 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.2 dated september 26, 2022). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 2,56. Number of copies printed 300. Rep. №876.

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Воробйов Б.В., Сенченко С.О., Пшеничников Д.О., Ліхно Я.В., Хань Л.
Система запобігання буксування електромобіля на основі контролера нечіткої логіки.....7

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Магро В.І., Плаксін С.В.
Дослідження випромінюючого модуля системи енергетичного менеджменту будівель..... 15

III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Дубровін В.І., Дейнега Л.Ю., Лактіонов В.В.
Система підтримки прийняття рішень для управління портфелями проєктів
енергозбереження на енергоємних підприємствах.....24

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

Vorobiov B.V., Senchenko S.O., Pshenychnykov D.O., Likhno Y.V., Khan L.
The system for electric vehicle slippage prevention based on a fuzzy logic controller.....7

II POWER ENGINEERING

Magro V.I., Plaksin S.V.
The study of the radiating module of the energy management system of buildings.....15

III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Dubrovin V.I., Deinega L.Y., Laktionov V.V.
Decision-making support system for managing portfolios of energy saving projects at energy-intensive enterprises.....24

УДК 621.331

СИСТЕМА ЗАПОБІГАННЯ БУКСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЕРА НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

- ВОРОБІЙОВ Б.В.** д-р філософії (к.т.н.), завідувач кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: bohdan.vorobiov@khpri.edu.ua;
- СЕНЧЕНКО С.О.** аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Serhii.Senchenko@ieeee.khpi.edu.ua;
- ПШЕНИЧНИКОВ Д.О.** к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: dmytro.pshenychnykov@khpri.edu.ua;
- ЛІХНО Я.В.** аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Yaroslav.Likhno@ieeee.edu.ua;
- ХАНЬ Л.** аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: seanhanzi@mail.com;

Мета роботи. Розробка функціональної схеми системи запобігання ковзанню, побудова математичної моделі, синтез нечіткого регулятора, моделювання та підтвердження працездатності системи.

Методи дослідження. Математичний аналіз та моделювання.

Отримані результати. Обґрунтовано структуру та визначено лінгвістичні змінні фази регулятора. Зроблено вибір кількості термів вхідних і вихідних змінних фази регулятора, виходячи з мінімізації кількості правил логічної обробки. Здійснено вибір термів лінгвістичних змінних фази регулятора у вигляді найпростіших трикутних для середніх значень діапазону їх визначення та трапецеїдальних для граничних значень. Розроблено правила логічної обробки. Здійснено вибір алгоритму нечіткого виведення та визначено параметри дефазифікації. Побудована комп'ютерна модель системи запобігання буксування з використанням Fuzzy logic toolbox пакета MATLAB та була побудована з використанням 9 правил логічної обробки. Проведено комп'ютерне моделювання розгону електромобіля з наступним буксуванням одним та двома колесами. Система підтримує узгодженість швидкостей коліс зі швидкістю електромобіля на постійному заданому рівні $1,5 \text{ c}^{-1}$ – відповідно до сформульованого алгоритма ідентифікації і повністю запобігає надмірному буксуванню.

Наукова новизна. Побудований фази регулятор забезпечує мінімізацію невідповідності швидкості обертання колеса лінійної швидкості руху електромобіля, що в свою чергу мінімізує пробуксовку і забезпечує максимально можливий момент, що крутить, відносно до моменту установки.

Практична цінність. Комп'ютерне моделювання проводилося для двох режимів: розгін з наїздом на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) одним колесом та розгін з наїздом на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) двома колесами. Система повністю запобігає надмірному ковзанню.

Ключові слова: електропривод; електромобіль; асинхронний двигун; комп'ютерна модель; механічний диференціал; нечіткий регулятор.

I. ВСТУП

Щороку понад 1,2 мільйона людей гинуть на дорогах і від 20 до 50 мільйонів зазнають травм без смертельного результату. Дорожньо-транспортний травматизм стабільно є однією з найчастіших причин смерті людей віком від 5 до 44 років. За прогнозами ВООЗ, до 2030 р. дорожньо-транспортний травматизм збільшиться і займе п'яте місце у списку провідних причин смерті [1].

Особливу небезпеку становлять режими

занесення – втрата зчеплення з дорожнім покриттям одного або кількох коліс, що спричиняє часткову або повну втрату керування транспортним засобом. Підвищити безпеку руху та усунути пробуксування в електромобілі (ЕМБ) можна за допомогою електроприводу (ЕП).

Для розпізнавання пробуксування використовується різниця між лінійною швидкістю електромобіля та швидкістю обертання кожного з коліс. Наявність пробуксування підтверджується різницею швидкості. Швидкість обертання колеса

вимірюється енкодером. Для отримання лінійної швидкості вимірюється прискорення, а потім інтегрується.

При тривалій їзді з постійною швидкістю мікроконтролер прирівнює поточну лінійну швидкість руху швидкості обертання одного з коліс і скидає датчик, приймаючи отриману швидкість за початкове значення.

Для зменшення або усунення пробуксовування провідних коліс використовується анти блокувальна система ABS, яка запобігає блокуванню коліс при гальмуванні. Відсутність пробуксовування провідних коліс необхідна забезпечення стійкого руху при гальмуванні.

Регулятор ЕП реалізований програмно з використанням мікроконтролера. Це дозволяє реалізувати будь-яку структуру регулятора.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для досягнення заданих параметрів показників якості регулювання часто використовують ПД-регулятор, переваги якого широко відомі [2]. Існує безліч методик оптимального налаштування регуляторів, що застосовуються у різних технологічних процесах [3] - [4]. Проте традиційний метод ПД-регулювання не може забезпечити прийнятну якість управління складними об'єктами, тому актуальними стають різні адаптивні методи [5]. Останнім часом під час вирішення подібних завдань почали використовувати методи інтелектуального управління, зокрема апарат нечіткої логіки.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є розробка функціональної схеми системи запобігання ковзанню, побудова математичної моделі, синтез нечіткого регулятора, моделювання та підтвердження працездатності системи.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Математична модель ЕП побудована з урахуванням таких припущень:

- провідні передні колеса;
- у електромобіля є коробка передач;
- механічна частина ЕМБ має диференціал;
- ЕМБ рухається прямолінійно.

Залежність коефіцієнта тертя ковзання від буксування для різних дорожніх умов (I – сухий асфальт, II – мокрий асфальт, III – сніг, IV – лід) представлена на рисунку 1 [6].

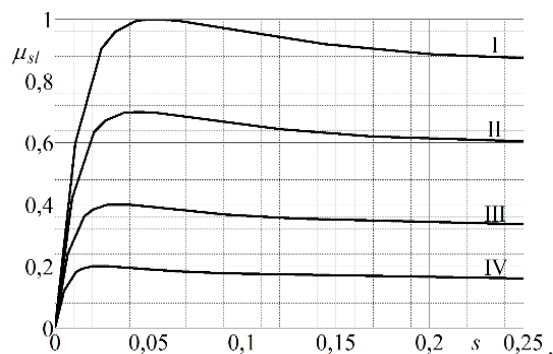


Рисунок 1. Залежність коефіцієнта тертя ковзання від прослизання

При наїзді одного колеса в зону зі зниженою силою тяги через диференціал значення моментів на пів осях коліс залишаються колишніми. При цьому збільшення швидкості прослизання другого колеса супроводжується збільшенням кутової швидкості веденої шестерні диференціала.

Швидкість руху не може зменшитися миттєво, а значить, збільшення швидкості колеса відбувається за рахунок збільшення швидкості прослизання.

Використовувалася математична модель ЕП ЕМБ у структурній формі, представлена у [7]. При складанні комп'ютерної моделі блоки системи керування та силового перетворювача збираються з використанням моделей елементів силових електричних кіл.

Заданим сигналом для ЕП є T_s - встановлення моменту, що імітує натискання водія педалі. У системі управління реалізовано векторне управління, саме пряме управління моментом (DTC) [8]. На підставі сигналу, що задає, а також миттєвих значень струмів статора і потокозчеплення система управління розраховує частоту і напругу, необхідні для підтримки моменту, який необхідно прикласти до обмотки статора двигуна. Виходом системи управління є імпульси, що керують ключами силового перетворювача.

Силовий перетворювач включає в себе автономний інвертор на основі IGBT-транзисторів і гальмівний резистор. Параметри перетворювача вибрано такі: опір ключів 1мОм. Падіння прямої напруги та падіння напруги на зворотних діодах прийнято рівними 1,4 В. Час наростання імпульсу 1 мкс, час спаду 2 мкс.

Модель асинхронного двигуна складається за рівняннями координатах $d-q$. Математичний опис ґрунтується на [8]. Вибір асинхронного двигуна проводився методом еквівалентної потужності з використанням стандартного міського циклу WLT [9], як базова циклограма руху. Було обрано двигун серії АИР180М2 потужністю $P_n = 30$ кВт, номінальною швидкістю $n_n = 2935$ об/хв і ККД $\eta = 91$ %.

Модель дозволяє моделювати ЕП при варіюванні

величезної кількості параметрів – моделювання процесів буксування одним або двома колесами, різка зміна параметрів двигуна, вихід з ладу одного з елементів силового ланцюга і т.д.

З використанням пакетів Simulink та SimPower програмного комплексу Matlab, а також структурної схеми ЕП [7], була синтезована комп'ютерна модель ЕП, яка представлена на рисунку 2. Параметри, що використовуються в моделі, взято характеристики побудованого на базі кафедри «АЕМС» НТУ «ХП». Для створення за основу було взято автомобіль Ланос з розрахунковою масою $m = 1500$ кг. Габаритні розміри та інші параметри взяті з [10]. Модель складається з акумулятора, гальмівного резистора, силового перетворювача, регулятора швидкості, регулятора моменту, асинхронного двигуна, блоку механіки, блоку формування сигналів завдання та блоків вимірювання.

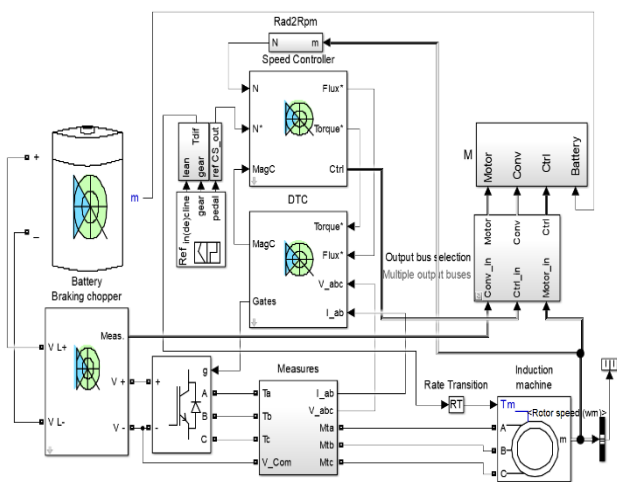


Рисунок 2. Комп'ютерна модель ЕП

На рисунку 3 показано блокову модель DTC.

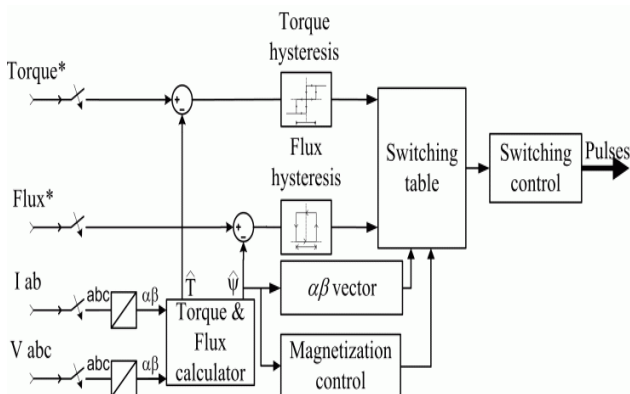


Рисунок 3. Загальна модель системи управління

Структура системи управління базується на блоках пакету SimPower Matlab. Блок калькулятора Torque & Flux використовується для оцінки

компонентів $\alpha\beta$ потоку двигуна та електромагнітного моменту. Цей калькулятор ґрунтується на синтезі рівняння двигуна. Блок вектора $\alpha\beta$ використовується для знаходження сектора площини $\alpha\beta$, де лежить вектор потоку. Площина $\alpha\beta$ розділена на шість різних секторів, що віддаляються один від одного на 60 градусів. Блоки Flux & Torque Hysteresis містять дворівневий компаратор гістерези для управління потоком і тривірневий компаратор гістерези для управління крутним моментом. Опис гістерезисних компараторів є нижче. Блок Switching table містить дві довідкові таблиці, які вибирають певний вектор напруги відповідно до вихідних даних компараторів Flux & Torque Hysteresis. Цей блок також здійснює початковий потік у машині. Блок управління перемиканням використовується обмеження частоти комутації інвертора до максимального значення, встановленого [11].

На рисунку 4 представлена модель механічної частини ЕП. Моделі складових навантаження, передавального числа та вузла формування сил нормального тиску представлені на рисунку 5.

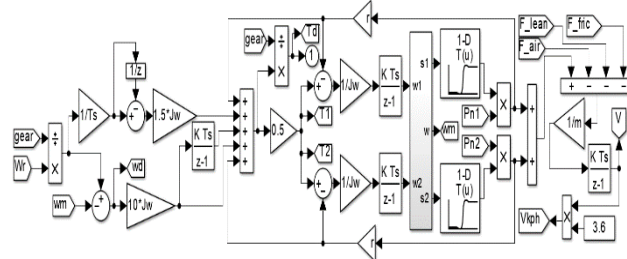


Рисунок 4. Комп'ютерна модель механічної частини ЕП

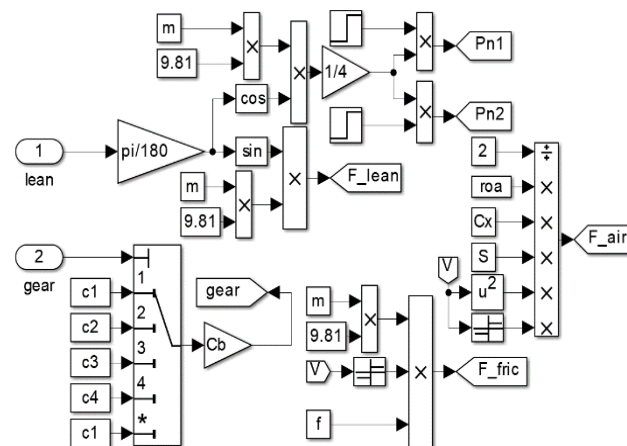


Рисунок 5. Модель формування складових навантаження ЕП, сил нормального тиску і-го колеса, передатного відношення на заданій передачі

Механічна модель складена відповідно до [7]. Позначення моделі механічної частини: T_s – крок дискретизації моделі; W_r – швидкість електродвигуна; w_1 і w_2 – кутові швидкості коліс; V , V_{kph} – лінійна

швидкість ЕМБ у м/с та км/год; F_{fric} , F_{air} , F_{lean} – сила тертя, сила опору повітря та сила тяжіння, що діють на ЕМБ при русі під ухил; $gear$ – передавальне число трансмісії; r – радіус колеса; J_w – наведений момент інерції колеса; T_d – момент на виході трансмісії; m – повна маса ЕМБ; T_1 , T_2 – моменти на колесах 1 і 2; w_m – усереднена швидкість двох коліс; s_1 , s_2 – прослизання коліс 1 і 2.

На рисунку 6 представлена функціональна схема ЕП із системою запобігання прослизання.

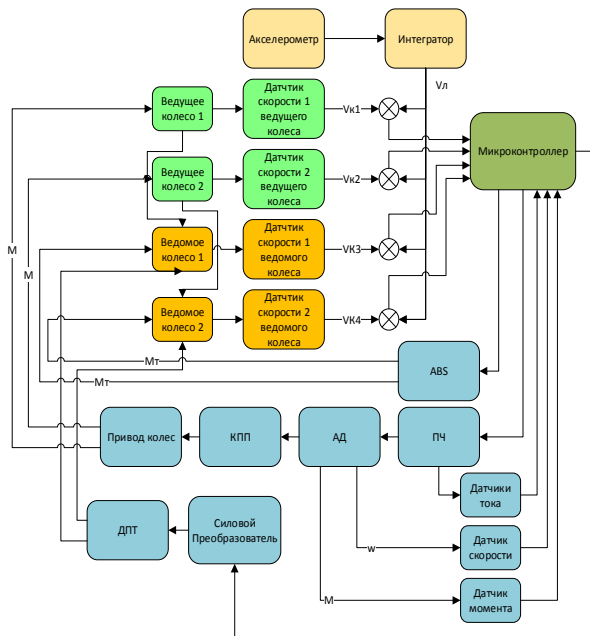


Рисунок 6. Функціональна схема ЕП ЕМБ із системою запобігання буксування

В більшості випадків синтез фазі-регулятора передбачає наступну послідовність операцій нечіткої логіки [10]:

- фазифікація – перетворення точних значень вхідних змінних на рівні їх приналежності до лінгвістичних змінних шляхом застосування положень теорії нечітких множин;
- нечіткий висновок та створення бази правил;
- дефазифікація – перетворення нечітких значень, отриманих в результаті нечіткого висновку, на конкретне числове значення.

Наведено наступну структуру нечіткого регулятора з двома входами (змiна неузгодженостi швидкостей першого колеса $\Delta\omega_{d1[n]}$ та неузгодження швидкостей другого колеса $\Delta\omega_{d2[n]}$) і одним виходом (корекція заданої напруги $\Delta U_{[n]}$), яка показана на рисунку 7.

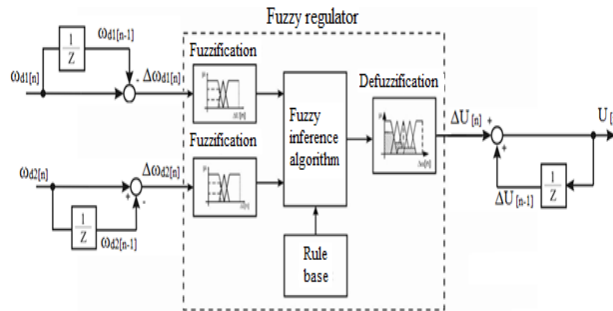


Рисунок 7. Структура нечіткого регулятора

Фазі регулятор, побудований за запропонованою структурною схемою, представленою на рисунку 7 повинен забезпечувати мінімізацію невідповідності швидкості обертання колеса лінійної швидкості руху ЕМБ, що в свою чергу мінімізує пробуксовку і забезпечує максимально можливий момент, що крутить, відносно до моменту установки (натискання на педаль газу).

Сформулюємо правила логічної обробки, спираючись на вигляд регулювальних характеристик, представлених на рисунку 8.

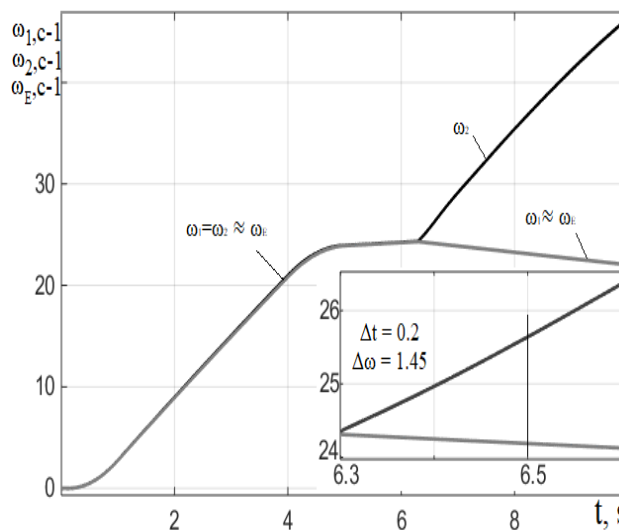


Рисунок 8. Швидкості двох коліс і приведена до кутової швидкості руху ЕМБ

Нехай у вихідному стані $\Delta\omega_{d1} = \Delta\omega_{d2} = 0$. У цьому випадку електромобіль або стоїть на місці, або рухається поверхнею з максимальним коефіцієнтом зчеплення. У цьому випадку, необхідність в корегуванні завдання моменту відсутній і $\Delta U = 0$.

Виходячи з вищесказаного, запишемо правила:

Якщо швидкості обох коліс збігаються зі швидкістю руху всього електромобіля, то:

Якщо $\Delta\omega_{d1} \in "0"$ та $\Delta\omega_{d2} \in "0"$, то $\Delta U \in "0"$.

Якщо має місце неузгодженість швидкості першого колеса:

Якщо $\Delta\omega_{d1} \in "+"$ та $\Delta\omega_{d2} \in "0"$, то $\Delta U \in "+"$.

Якщо має місце неузгодженість швидкості другого колеса:

Якщо $\Delta\omega_{d1} \in "0"$ та $\Delta\omega_{d2} \in "+"$, то $\Delta U \in "+"$.

Якщо має місце неузгодженість швидкостей обох коліс зі швидкістю всього електромобіля, то:

Якщо $\Delta\omega_{d1} \in "+"$ та $\Delta\omega_{d2} \in "+"$, то $\Delta U \in "++"$.

Якщо швидкість одного з коліс має додатну неузгодженість, а другого – від’ємну (що в реальному житті можливо тільки під час буксування під час розвороту або аварійного обертання під час руху), то:

Якщо $\Delta\omega_{d1} \in "-"$ та $\Delta\omega_{d2} \in "+"$, то $\Delta U \in "+"$.

Якщо $\Delta\omega_{d1} \in "+"$ та $\Delta\omega_{d2} \in "-"$, то $\Delta U \in "+"$.

У разі, якщо неузгодженості будь-якого з коліс від’ємні або нульові, то:

Якщо $\Delta\omega_{d1} \in "0"$ та $\Delta\omega_{d2} \in "-"$, то $\Delta U \in "0"$.

Якщо $\Delta\omega_{d1} \in "-"$ та $\Delta\omega_{d2} \in "0"$, то $\Delta U \in "0"$.

Якщо $\Delta\omega_{d1} \in "-"$ та $\Delta\omega_{d2} \in "-"$, то $\Delta U \in "0"$.

Таким чином, всі правила логічної обробки враховують зміна коефіцієнта зчеплення коліс з дорогою були складені.

Подана база правил логічної обробки у вигляді табл. 1. База правил була складена спираючись на якісні графіки швидкостей обертання коліс та швидкості руху всього електромобіля і не залежить від параметрів електроприводу, що дозволяє застосовувати її для управління будь-якого АД.

Таблиця 1. Таблиця правил логічної обробки

$\Delta\omega_{d1} \backslash \Delta\omega_{d2}$	Негативний	Нуль	Позитивний
Негативний	0	0	+
Нуль	0	0	+
Позитивний	+	+	++

Для побудови комп’ютерної моделі використовувався тулбок Fuzzy logic toolbox пакета MATLAB. Модель реалізує алгоритм розпізнавання буксування, описаний у [7]. Побудована модель представлена на рисунку 9.

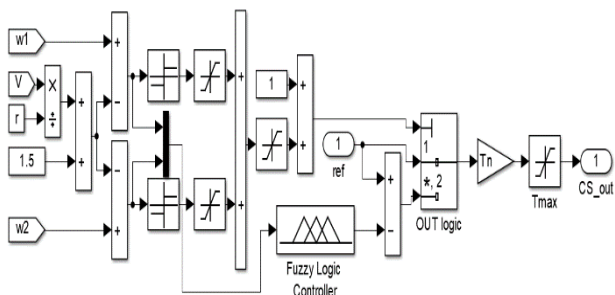


Рисунок 9. Комп’ютерна модель системи запобігання буксування

Сигнали швидкостей коліс порівнюються з кутовою швидкістю руху електромобіля. Якщо

різниця більше $1,5 \text{ c}^{-1}$, то на вхід селектора OUT logic подається сигнал і система керування перемикає сигнал завдання з ref на ref + Uсог. Таким чином, якщо неузгодженість становить менш $1,5 \text{ c}^{-1}$, то вихідним сигналом системи запобігання буксування буде просто сигнал завдання (при натисканні педалі), а якщо більше – сума сигналу завдання і коригуюча напруга, який формує фазі регулятор. Для синтезу фазі регулятора використовувалися параметри, визначені раніше, а також таблиця правил (табл. 1).

Комп’ютерне моделювання проводилося для двох режимів: розгін з наїздом на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) одним колесом та розгін з наїздом на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення (0,1) двома колесами.

Моделювання роботи системи при буксуванні одним колесом проводилося наступним чином: електромобіль починає рух на фіксованій другій передачі по поверхні з коефіцієнтом зчеплення 1. На 2 секунді відбувається наїзд на поверхню з коефіцієнтом зчеплення 0,1 другим колесом.

На рисунку 10 показані графіки перехідних процесів моменту і швидкості обох коліс при буксуванні другого колеса.

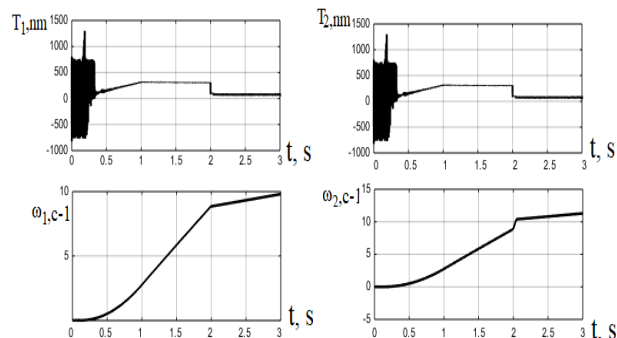


Рисунок 10. Швидкості та крутні моменти двох коліс із прослизанням другого колеса

З графіків видно, що з 2 секунди мало місце зниження моменту першого колеса і, як наслідок, зменшилося прискорення. При цьому електромобіль продовжив розгін. На 2 секунді, друге колесо після зниження зчеплення з дорогою, починає розгін до моменту, коли неузгодженість складе більш ніж $1,5 \text{ c}^{-1}$. У цей момент знижується задаючий сигнал, а отже, і момент. Криві моменту обох коліс ідентичні.

На рисунку 11 показані графіки моменту і швидкості обох коліс. Графіки швидкості і моменту коліс під час буксування практично ідентичні отриманим раніше графікам для другого колеса, проте момент ще більш знижений для підтримки постійної неузгодженості.

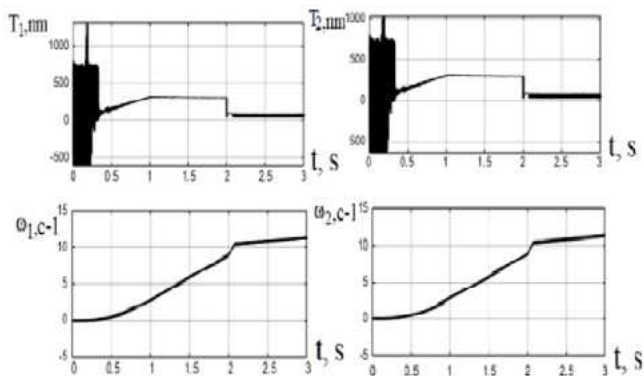


Рисунок 11. Швидкості та моменти двох коліс у момент пуску з ковзанням

Електромобіль продовжує прискорення з рівномірним прискоренням обох коліс. На рисунку 12 показано порівняння швидкостей двох коліс з приведеною до кутової швидкості руху всього електромобіля.

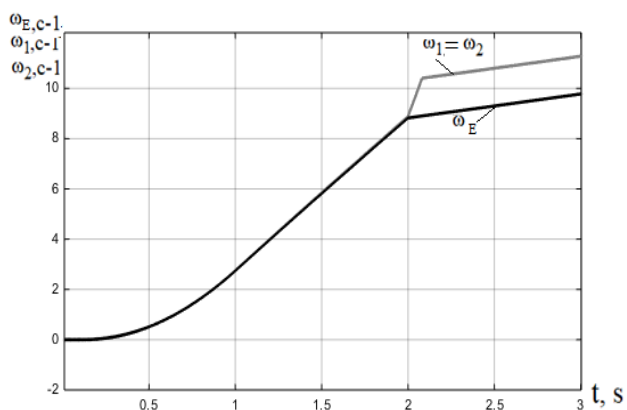


Рисунок 12. Швидкості двох коліс та всього електромобіля під час розгону з буксуванням

Після наїзду на поверхню зі зниженим коефіцієнтом зчеплення, обидва колеса починають розганятися до моменту перевищення допустимої неузгодженості. Після включення системи запобігання буксування сигнал завдання моменту знижується до максимально можливої величини так, щоб неузгодженість не перевищувала максимально задану величину. З графіка видно підтримку неузгодженості на постійному рівні та продовження розгону ЕМБ. На рисунку 13 показаний вихідний сигнал фази регулятора.

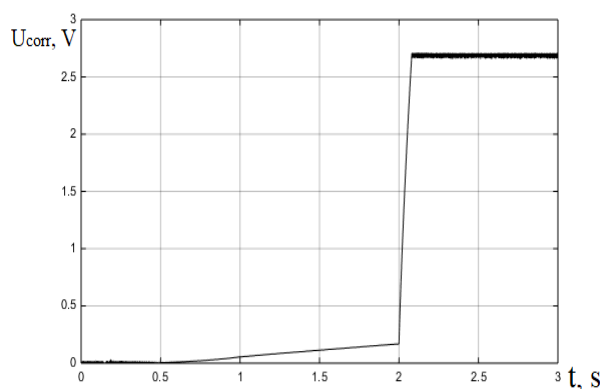


Рисунок 13. Вихідний сигнал фази регулятора (коригуюча напруга) при буксуванні двох коліс

Величина коригуючої напруги U_{corr} в сталому розгоні склала 2,7 В. Значення вихідної величини регулятора відповідає виконанню правила: Якщо $\Delta\omega_{d1}$ є "+" та $\Delta\omega_{d2}$ є "+", то ΔU є "++".

Система повністю коректно відпрацьовує неузгодженість швидкостей і підтримує стабільний розгін навіть при критично низькому коефіцієнті зчеплення.

На рисунку 14 показаний графік перехідних процесів струму фази А.

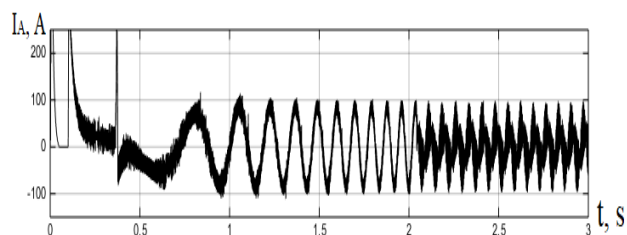


Рисунок 14. Струм статора фази А

Графік струму повністю відповідає графіку моменту і показує зниження на ділянці після 2 с.

На рисунку 15 показані графіки перехідних процесів моменту двигуна – задаючого і реального.

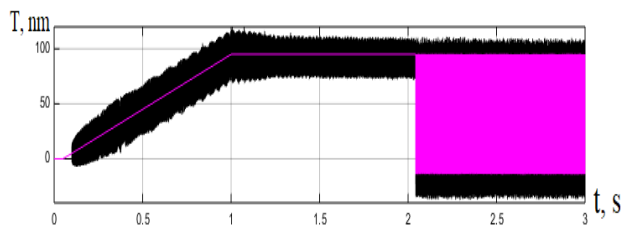


Рисунок 15. Момент на валу двигуна і задаючий момент

З графіка видно, що система управління ДТС точно відпрацьовує задаючий момент. Після наїзду колесами на ділянку зі зниженим коефіцієнтом

зчеплення, графік добре ілюструє роботу системи управління – як тільки неузгодженість перевищує максимально допустиму величину, система запобігання буксування знижує задаючий момент до тих пір, поки неузгодженість не прийде в норму. Потім система відключає корекцію напруги, поки неузгодженість знову не перевищить максимально допустиме значення. Таким чином, система керування працює у змішаному тригерному режимі.

V. ВИСНОВКИ

Обґрунтовано структуру та визначено лінгвістичні змінні фази регулятора. Зроблено вибір кількості термів вхідних і вихідних змінних фази регулятора, виходячи з мінімізації кількості правил логічної обробки. Здійснено вибір термів лінгвістичних змінних фази регулятора у вигляді найпростіших трикутних для середніх значень діапазону їх визначення та трапецеїдальних для граничних значень. Розроблено правила логічної обробки. Здійснено вибір алгоритму нечіткого виведення та визначено параметри дефазифікації. Побудована комп'ютерна модель системи запобігання буксування з використанням Fuzzy logic toolbox пакета MATLAB та була побудована з використанням 9 правил логічної обробки. Проведено комп'ютерне моделювання розгону електромобіля з наступним буксуванням одним та двома колесами. Система підтримує неузгодженість швидкостей коліс зі швидкістю електромобіля на постійному заданому рівні $1,5 \text{ c}^{-1}$ – відповідно до сформульованого алгоритму ідентифікації і повністю запобігає надмірному буксуванню. Зроблений висновок про працездатність системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Доклад о состоянии безопасности дорожного движения в мире. Режим доступу: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44122/9789244563847_rus.pdf;jsessionid=78E49896549A16CCA4A3C4EA29FD8042?sequence=2.
- [2] Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. – Vol. 13. – № 4. – P. 559–576. DOI:

10.1109/TCST.2005.847331

- [3] Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control. Proc. IFAC Workshop. Terrassa, Spain, 2000.
- [4] Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME. 1942. V. 64. P. 759–768.
- [5] A. Gad and M. Farooq. Application of fuzzy logic in engineering problems. Proc. IECON. 2001. P. 2044–2049.
- [6] Rajamani, R., Piyabongkarn, N., Lew, J., Yi, K., Phanomchoeng, G. Tire-Road Friction-Coefficient Estimation. IEEE. 2010, DOI: 10.1109/MCS.2010.937006
- [7] Vorobyov Bogdan, Pshenychnykov Dmytro. Modeling of the Operation of an Asynchronous Electric Drive of an Electric Vehicle in Slip Modes. 25th IEEE International conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP 2020.
- [8] C. Carlos. Modeling, vector control and DTC: control of asynchronous machines. Hermes Science, Europe Ltd. 2000.
- [9] Bolee realistischny`e pokazateli potrebleniya topliva: novy`j standart ezdovogo czikla WLTP zamenit dejstvuyushhij NEDC. Режим доступу: <https://www.audi.ru/ru/web/ru/innovations/wltp-lp.html>
- [10] Klepikov V. B., Semikov A. V. i dr. Iz opyita sozdaniya elektroprivoda elektromobilya s superkondensatornyim nakopitelem energii [From the experience of creating electric drive electric vehicle with a super capacitor energy storage]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]. Kharkiv: NTU «KhPI» 2015, Vyp. 112 (1121). P. 195–198.
- [11] Bose, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, N.J., 2002. P. 558.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2022

THE SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE SLIPPAGE PREVENTION BASED ON A FUZZY LOGIC CONTROLLER

VOROBIOV B.V.

Ph.D, Head of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: bohdan.vorobiov@khipi.edu.ua;

SENCHENKO S.O.

Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Serhii.Senchenko@ieeekhipi.edu.ua;

PSHENYCHNYKOV D.O.

Ph. D, Associate professor, Associate professor of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv

- Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: dmytro.pshenychnykov@khpі.edu.ua;
- LIKHNO Y.V. Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Yaroslav.Likhno@ieeee.edu.ua;
- KHAN L. Ph.D. student of the Department Automated Electromechanical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: seanhanzi@mail.com;

Purpose. Development of a functional diagram of a slip prevention system, build a mathematical model, synthesize a fuzzy regulator, simulate and confirm the system's performance.

Methodology. Mathematical analysis and modeling.

Findings. The structure is substantiated and the linguistic variables of the fuzzy regulator are determined. The choice of the number of terms of the input and output variables of the fuzzy controller is made, proceeding from the minimization of the number of logical processing rules. The terms of the linguistic variables of the fuzzy controller are selected in the form of the simplest triangular for the mean values of the range of their definition and trapezoidal for the limit values. Logical processing rules were developed. The choice of the fuzzy inference algorithm was made and the defuzzification parameters were determined. A computer model of the slip prevention system was built using the Fuzzy logic toolbox of the MATLAB package and was framed using 9 logic processing rules. Computer simulation of the acceleration of an electric vehicle with subsequent slipping by one and two wheels has been carried out. The system maintains the inconsistency of wheel speeds with the electric vehicle speed at a constant set level of 1.5s-1 - in accordance with the formulated identification algorithm and completely prevents excessive slipping.

Originality. The built-in phase regulator ensures minimization of the discrepancy between the speed of the wheel rotation and the linear speed of the electric vehicle, which in turn minimizes slippage and provides the maximum possible torque relative to the moment of installation.

Practical value. Computer simulation was carried out for two modes: acceleration with a collision with a surface with a reduced coefficient of adhesion (0.1) with one wheel and acceleration with a collision with a surface with a reduced coefficient of adhesion (0.1) with two wheels. The system completely prevents excessive slipping.

Keywords: electric drive; electric vehicle; asynchronous motor; computer model; mechanical differential; fuzzy controller.

REFERENCES

- [1] Doklad o sostoyaniy bezopasnosty dorozhnoho dvyzhenia v myre. Access mode: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44122/9789244563847_rus.pdf;jsessionid=78E49896549A16CCA4A3C4EA29FD8042?sequence=2
- [2] Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. – Vol. 13. – № 4. – P. 559–576. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331
- [3] Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control. Proc. IFAC Workshop. Terrassa, Spain, 2000.
- [4] Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME. 1942. V. 64. P. 759–768.
- [5] A. Gad and M. Farooq. Application of fuzzy logic in engineering problems. Proc. IECON. 2001. P. 2044–2049.
- [6] Rajamani, R., Piyabongkarn, N., Lew, J., Yi, K., Phanomchoeng, G. Tire-Road Friction-Coefficient Estimation. IEEE. 2010, DOI: 10.1109/MCS.2010.937006
- [7] Vorobyov Bogdan, Pshenychnykov Dmytro. Modeling of the Operation of an Asynchronous Electric Drive of an Electric Vehicle in Slip Modes. 25th IEEE International conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP 2020.
- [8] C. Carlos. Modeling, vector control and DTC: control of asynchronous machines. Hermes Science, Europe Ltd. 2000.
- [9] Bolee realistichny`e pokazateli potrebleniya topliva: novy`j standart ezdovogo czikla WLTP zamenit dejstvuyushhij NEDC. Режим доступу: <https://www.audi.ru/ru/web/ru/innovations/wltp-lp.html>
- [10] Klepikov V. B., Semikov A. V. i dr. Iz opyita sozdaniya elektroprivoda elektromobilya s superkondensatornym nakopitelem energii [From the experience of creating electric drive electric vehicle with a super capacitor energy storage]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». [Bulletin of the National Technical University “KhPI”]. Kharkiv: NTU «KhPI» 2015, Vyp. 112 (1121). P. 195–198.
- [11] Bose, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, N.J., 2002. P. 558.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮЮЧОГО МОДУЛЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ БУДІВЕЛЬ

МАГРО В.І.

к.ф.-м.н., доц., доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: magrov@i.ua;

ПЛАКСІН С.В.

д.ф.-м.н., с.н.с., завідувач відділу систем керування Інституту транспортних систем та технологій «Трансмаг» Національної академії наук України, Дніпро, Україна, e-mail: svp@westa-inter.com

Мета роботи. Вдосконалення інструментарію взаємодії між сенсорами та системою керування будівлі за допомогою використання трикутної мікросмужкової антени.

Методи дослідження. Математичне моделювання методом кінцевих різниць у часовій області.

Отримані результати. Запропоноване технічне рішення полягає у виборі оптимальної конструкції випромінюючого модулю у формі трикутної мікросмужкової антени, шляхом математичного моделювання, значень геометричних розмірів трикутника, товщини діелектричного шару та значення його діелектричної проникності, загальних розмірів випромінюючого модулю які забезпечують оптимальне узгодження антени з фідером живлення у вигляді мікросмужкової лінії. Розроблено комп'ютерну модель трикутної мікросмужкової антени методом кінцевих різниць у часовій області дозволяє провести дослідження щодо параметрів даної антени, які забезпечують стійкий бездротовий зв'язок між системою давачів (сенсорів) та блоком керування автоматизацією будинка. Умовою підвищення ступеня узгодження антени із лінією живлення вибір способу живлення антени. Встановлено, що найбільш оптимальним способом живлення трикутної антени є спосіб приєднання мікросмужкової лінії до середини сторони трикутника, у порівнянні зі способом приєднання лінії живлення до вершини трикутника. Проведено оптимізацію ширини мікросмужкової лінії живлення по критерію мінімізації модуля коефіцієнта відбиття на вході антени. Проведено дослідження ступеня узгодженості антени на робочих частотах 2,4 та 7 ГГц. На частоті 7 ГГц величина модуля коефіцієнта відбиття складає $-23,6776$ дБ. Розраховані тривимірні та двовимірні діаграми спрямованості даної антени. Діаграма спрямованості має майже сферичну форму, тобто дозволяє розміщувати випромінюючий модуль у довільній орієнтації щодо земної поверхні. Це дозволяє використовувати трикутну мікросмужкову антену у якості випромінюючого модуля системи енергетичного менеджменту будівель та системи розумний дім.

Наукова новизна. Дослідження способів живлення трикутної мікросмужкової антени дозволяє знайти оптимальне узгодження антени із лінією живлення, що забезпечує формування характеристик випромінювання які забезпечують ефективну взаємодію між давачами (сенсорами) та системою керування енергетичного менеджменту будівлі.

Практична цінність. Отримані в результаті дослідження характеристик випромінювання трикутної мікросмужкової антени дозволяють використовувати її для організації бездротового каналу зв'язку в 4% смузді робочих частот.

Ключові слова: енергетичний менеджмент, система керування, розумний дім, випромінюючий модуль, мікросмужкова трикутна антена, модуль коефіцієнта відбиття, характеристики випромінювання.

I. ВСТУП

Система енергетичного менеджменту будівель, яка в англійській літературі позначається як BEMS (Building Energy Management System) є однією із складових частин технічних рішень для розв'язання екологічних проблем, таких як виснаження енергетичних ресурсів, глобальне потепління та зміна клімату. На основі BEMS можуть бути вирішені не тільки енергетичні проблеми. Дана система додатково повинна гарантувати мешканцям комфортні умови проживання в будівлі [1] - [2]. З іншого боку системи опалення, система вентиляції та кондиціонування повітря та системи освітлення складають основну частину енергоспоживання будівлі [3]. І ці

енерговитрати необхідно контролювати та мінімізувати.

В свою чергу система енергетичного менеджменту будівель є складовою частиною більш складної системи що зветься розумний будинок (Smart Home, Digital House) [4]. Система з багатьох розумних будинків може інтегруватись в систему розумне місто (Smart City), принаймні в частині моніторингу службами управління міським господарством за витратами енергетичних витрати, витрати води тощо [5]. Також система енергетичного менеджменту будівель може бути інтегрована в систему інтелектуальних мереж, які англійською літературі позначаються як Smart Grid [6].

Всі ці інтеграції системи енергетичного менеджменту будівель забезпечуються за рахунок інформаційно-комунікаційних технологій, які зокрема можуть бути побудовані на основі бездротових технологій. Такі технології передбачають наявність випромінюючих пристроїв, що забезпечують передавання інформації по каналах зв'язку. Нині впроваджується система мобільного зв'язку 5G, яка працює на частотах 800 МГц – 7,125 ГГц, і яка може бути використана для організації каналу зв'язку [7]. Іншою технологією, за рахунок якої можна організувати канал зв'язку є технологія Wi-Fi, що постійно оновлюється. Останнім часом ведуться інтенсивні розробки Wi-Fi 7, що в найближчому майбутньому буде стандартизовано [8]. Як і в попередній технології Wi-Fi 6E в Wi-Fi 7 використовується декілька паралельних мережевих з'єднань з метою підвищення пропускної спроможності каналу зв'язку. Окрім частот 5 та 6 ГГц, в Wi-Fi 7 може бути використана частота біля 7 ГГц. Все це зумовлює необхідність в розробці ефективних випромінюючих пристроїв що працюють на частоті 7 ГГц, та можуть бути використані для організації каналів зв'язку в перелічених вище системах.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Перехід людства в четверту промислову революцію стимулював розвиток інформаційно-комунікаційних технологій, і як наслідок зумовив взаємодію людина-машина (Human-Machine Teaming, НМТ) у багатьох сферах життєдіяльності, в тому числі і в повсякденному житті [9].

Сьогодні дослідження в галузі НМТ зробили крок вперед і переключилися на Інтернет, який раніше використовувався для спілкування, створивши нову концепцію Інтернет речей (Internet of Things, IoT) [10] - [11]. Метою IoT є будь-яка взаємодія між фізичними пристроями, в тому числі і давачами/сенсорами через Інтернет. Підхід IoT можна застосовувати і до енергетичного менеджменту, отримуючи доступ до системи керування домом з будь-якого місця. Нові технології та програми в області Інтернету речей вимагають високодинамічної інфраструктури сенсорної мережі [11], яка реалізується за допомогою бездротових технологій. Виявлення послуг, доступних у таких динамічних мережах, є складною проблемою, яку необхідно вирішити.

Зараз основні зусилля людства спрямовані на економію енергоресурсів, в тому числі на економію електроенергії. Щоб заощадити енергоспоживання будівель, доцільно використовувати розумну, енергоефективну систему домашньої автоматизації з використанням IoT [12] - [20].

В роботах [12] - [14] основна увага приділяється підвищенню енергоефективності в системі кондиціонування повітря в комерційній будівлі шляхом контролю припливного повітря та

температури приміщення.

В роботах [15] - [17] пропонуються технічні рішення спрямовані на контроль освітлення приміщень шляхом постійного моніторингу навколишньої яскравості та відповідно зміни інтенсивності світла в приміщенні та навколо нього.

В рамках концепції Smart Grid останнім часом розвивається напрямок інтелектуальних лічильників, які можуть встановлюватися зокрема в комерційних будівлях таких як великі торгові центри та багатоквартирні будинки [21]-[22]. Інтелектуальні давачі в інтелектуальних мережах надають дані в реальному часі та статус двонапрямлених потоків енергії для моніторингу, захисту та контролю роботи мережі для підвищення надійності та стійкості. Взаємодія даних інтелектуальних датчиків є серйозною проблемою для Smart Grid. Для взаємодії датчика та блока моніторингу необхідний ефективний випромінюючий модуль, який забезпечить передачу інформації в режимі реального часу.

Оскільки попит на електроенергію зростає, то енергетичний менеджмент стосовно приватних будинків та багатоквартирних домів повною мірою реалізується системою розумний дім, що забезпечує віддалений доступ для керування побутовою технікою, системою опалення та кондиціонування за допомогою IoT [22] - [24]. В цьому підході домашня автоматизація здійснюється за допомогою IoT з використанням бездротових технологій, невід'ємною частиною яких є випромінюючий/приймаючий модуль. Тому необхідно дослідити характеристики випромінювання такого пристрою.

III. МЕТА РОБОТИ

Впровадження енергетичного менеджменту будівель вимагає організацію бездротового каналу зв'язку між давачем/сенсором та блоком керування. У статті розглядається випромінюючий модуль у вигляді трикутної мікросмушкової антени для системи енергетичного менеджменту будівель.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ЗДОБУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Вибір робочої частоти випромінюючого модуля проводився із урахуванням впровадження мобільного зв'язку п'ятого покоління, що використовує частоти вищі за 6 ГГц. З іншого боку враховувалась можливість використання випромінюючого модулі згідно зі стандартом IEEE 802.11a, де робочою частотою є 2,4 ГГц.

Для побудови математичної моделі трикутної мікросмушкової антени використані наближені формули наведені в роботах [25] - [26], що дозволяють розрахувати робочу (резонансну) частоту на якій працює антена з урахуванням геометричних розмірів, таких як: розмір сторони рівностороннього трикутника a , товщина діелектричного шару h , відносна діелектрична проникність матеріалу

діелектричного шару ε (при $\varepsilon=4,4$) (рис.1). Розрахунок проведений для параметрів наведених в табл.1 показав, що розрахункова робоча частота даної структури складає $f_{рез}=6,81$ ГГц.

Виконано математичне моделювання вказаної геометрії випромінюючого модулю методом кінцевих різниць у часовій області. Побудовано такі математичні моделі живлення трикутної мікросмужкової антени: живлення трикутної антени за допомогою мікросмужкової лінії що приєднана до середини сторони трикутника (рис. 1) та за допомогою мікросмужкової лінії що приєднана до вершини трикутника (рис. 2).

З точки зору технологічності може бути застосовано два способи живлення: приєднання до середини сторони (схема 1) чи приєднання до вершини трикутника (схема 2). В багатьох роботах немає відповіді на питання, який із способів є більш ефективним, тому має сенс дослідити різні способи живлення. Розрахункові геометричні розміри схеми 2 наведено в табл. 2.

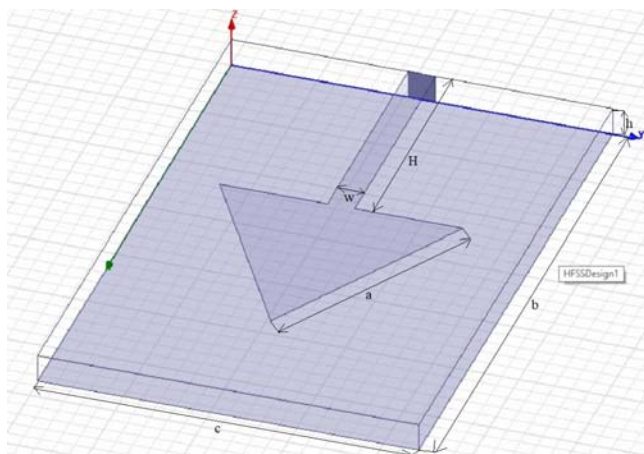


Рисунок 1. Схема живлення трикутної антени за допомогою мікросмужкової лінії приєднаної до середини сторони трикутника (схема 1)

Таблиця 1. Геометричні розміри антени із схемою живлення за допомогою мікросмужкової лінії приєднаної до середини сторони трикутника

Елементи антени	Розміри (мм)
a (сторона трикутника)	14
w (ширина смужки)	1,6
H (довжина смужки)	14
h (товщина діелектричного шару)	1,6
b (довжина випромінюючого модуля)	33,5
c (ширина випромінюючого модуля)	22

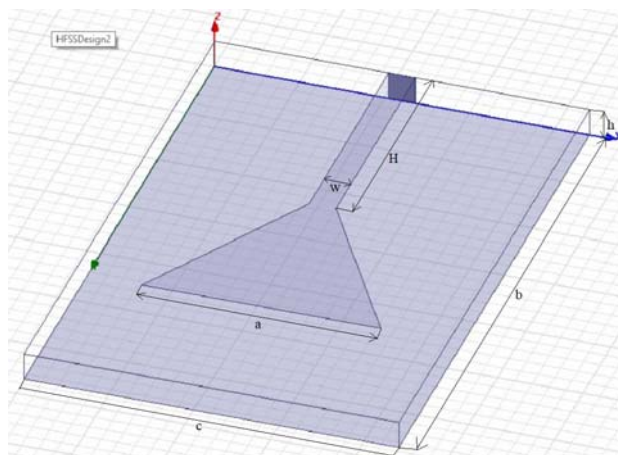


Рисунок 2. Схема живлення трикутної антени за допомогою мікросмужкової лінії приєднаної до вершини трикутника (схема 2)

Таблиця 2. Геометричні розміри антени із схемою живлення за допомогою мікросмужкової лінії приєднаної до вершини трикутника

Елементи антени	Розміри (мм)
a (сторона трикутника)	14
w (ширина смужки)	1,6
H (довжина смужки)	14
h (товщина діелектричного шару)	1,6
b (довжина випромінюючого модуля)	33,5
c (ширина випромінюючого модуля)	22

Завданням поточного дослідження є знаходження оптимальної схеми живлення для трикутної антени за критерієм мінімуму коефіцієнта відбиття на вході.

Важливим параметром що показує ступінь узгодження антени із смужкою живлення є параметр S_{11} . Для кожного із способів живлення побудовано залежність параметра S_{11} від частоти. Дослідження проведено на смузі частот від 2,5 ГГц до 10 ГГц. Результати розрахунку залежності параметра матриці розсіювання S_{11} (в дБ) від частоти (в ГГц) показано на рис. 3.

З рис. 3 можна зробити висновок, що краще узгодження трикутної антени з лінією живлення спостерігається для схеми 1, тобто коли мікросмужкова лінія приєднана до середини сторони трикутника.

В процесі дослідження виконувалась зміна ширини мікросмужкової лінії, з метою досягнення оптимального узгодження між вхідним опором трикутної антени та хвильовим опором мікросмужкової лінії живлення. Враховуючи попередні дослідження, які показали що в усій смузі робочих частот трикутна антена має значно більшу

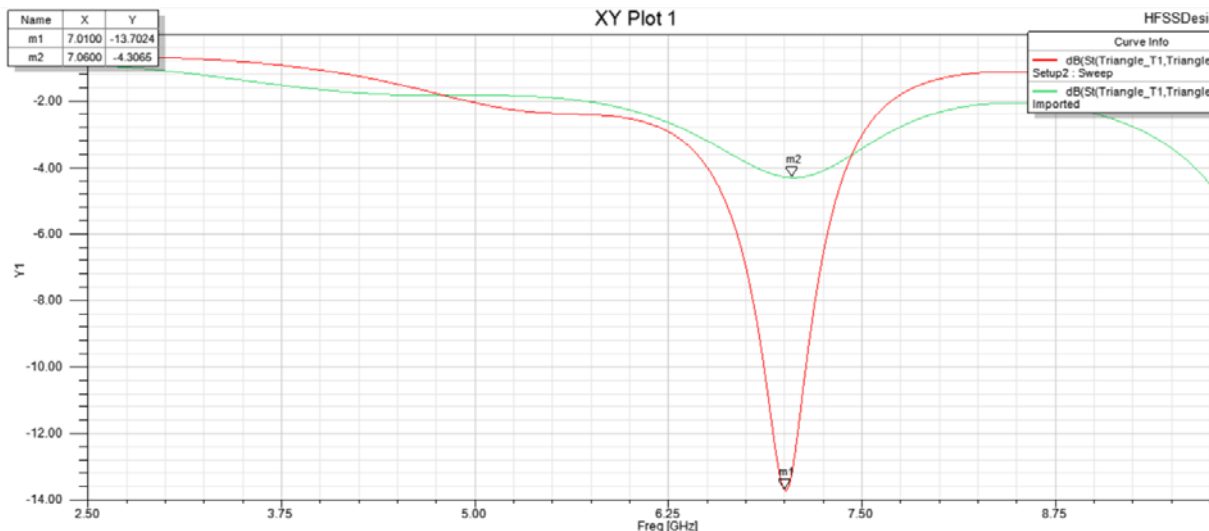


Рисунок 3. Залежність параметра S_{11} від частоти: червона лінія – для схеми 1, зелена лінія – для схеми 2

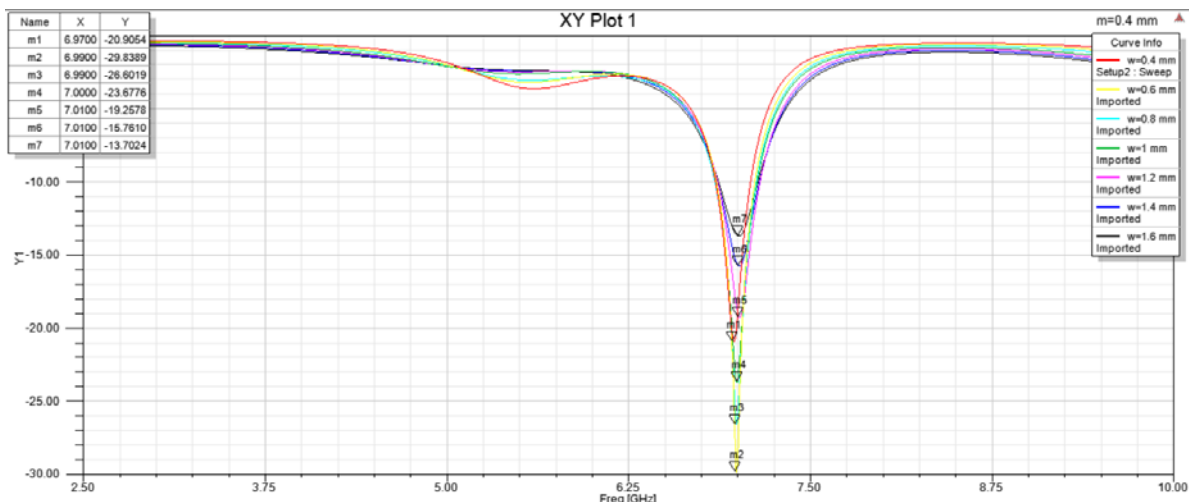


Рисунок 4. Залежність параметра S_{11} від частоти при різних розмірах ширини смужки: червона лінія – $w=0.4$ мм, жовта лінія – $w=0.6$ мм, бірюзова лінія – $w=0.8$ мм, зелена лінія – $w=1$ мм, фіолетова лінія – $w=1.2$ мм, синя лінія – $w=1.4$ мм, чорна лінія – $w=1.6$ мм

величину S_{11} (модуль коефіцієнта відбиття) при схемі 2, дане дослідження виконувалось тільки для схеми 1. В процесі дослідження послідовно змінювалась ширина смужки від $w=0,4$ мм до $w=1,6$ мм з кроком $0,2$ мм. Отримана залежність параметра матриці розсіювання S_{11} від частоти в залежності від ширини смужки показана на рис. 4.

З рис. 4 видно, що: при $w=0,4$ мм узгодження спостерігається на рівні $-20,9064$ дБ при $f_{pez}=6,97$ ГГц; при $w=0,6$ мм узгодження спостерігається на рівні $-29,8389$ дБ при $f_{pez}=6,99$ ГГц; при $w=0,8$ мм узгодження спостерігається на рівні $-26,6019$ дБ при $f_{pez}=6,99$ ГГц; при $w=1$ мм узгодження спостерігається на рівні $-23,6776$ дБ при $f_{pez}=7$ ГГц; при $w=1,2$ мм узгодження спостерігається на рівні $-19,2578$ дБ при $f_{pez}=7,01$ ГГц; при $w=1,4$ мм узгодження

спостерігається на рівні $-15,7610$ дБ при $f_{pez}=7,01$ ГГц; при $w=1,6$ мм узгодження спостерігається на рівні $-13,7024$ дБ при $f_{pez}=7,01$ ГГц.

Тобто можна зробити висновок, що при збільшенні ширини смужки узгодження зменшується, а мінімальний коефіцієнт відбиття спостерігається при $w=0,6$ мм.

Проведений аналіз різних методів живлення та різної ширини мікросмужкової лінії показав, що краще узгодження спостерігається при ширині смужки $0,6$ мм та при живленні антени до середини сторони трикутника. Надалі при розрахунках будуть використані саме ці данні.

Попереднє дослідження враховувало тенденцію що спостерігається в технології 5G, а саме

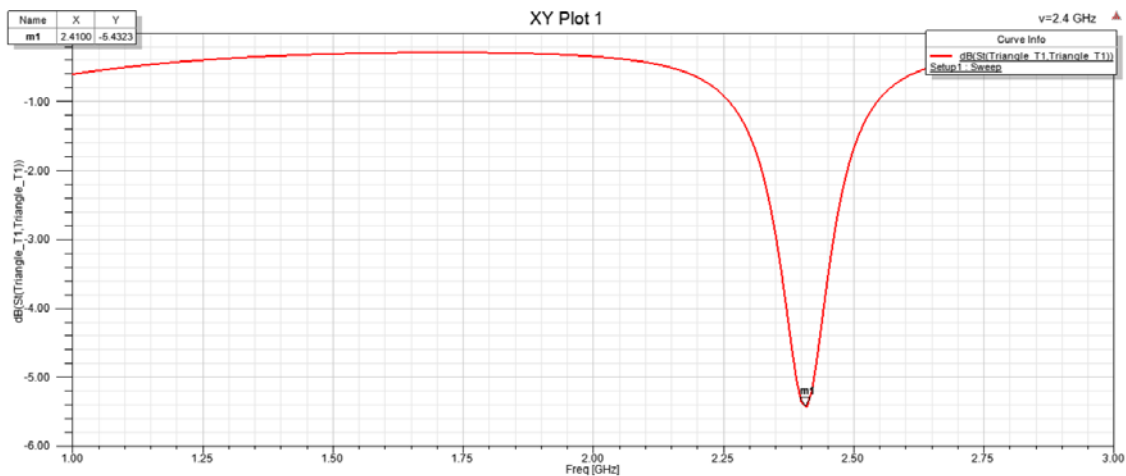


Рисунок 5. Залежність параметра S_{11} від частоти для схеми 3

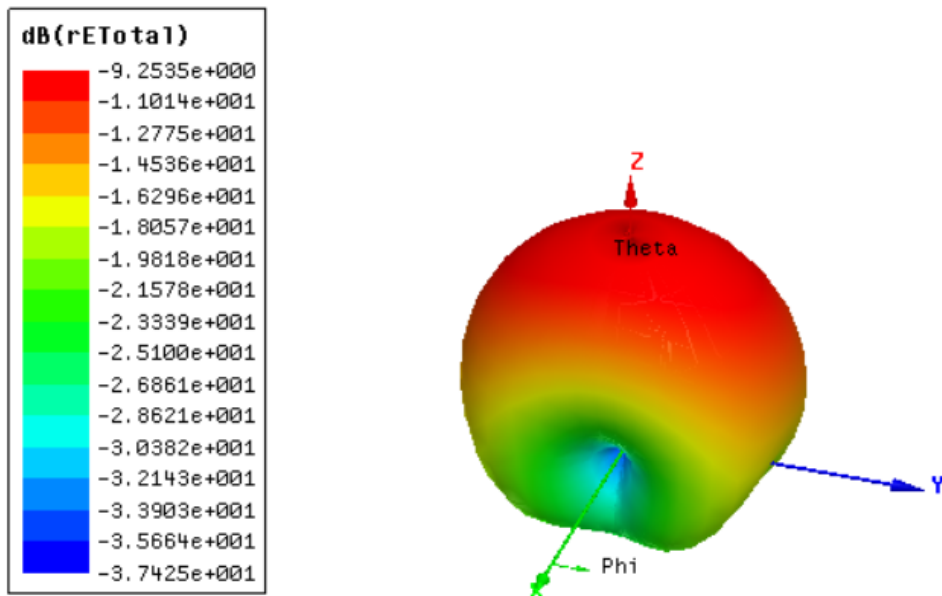


Рисунок 6. Тривимірна діаграма спрямованості

використання частот поблизу 7 ГГц. Тому попередній розрахунок був призначений для майбутніх пристроїв в рамках 5G. Але з іншого боку нині використовується стандарт IEEE 802.11a, де робочою частотою є 2,4 ГГц. Це зумовлює дослідження характеристик трикутної антени на частоті 2,4 ГГц.

Розглянемо антену, що розрахована на частоту $f_{рез}=2,4$ ГГц. Для розрахунку геометричних розмірів трикутника використаємо формули наведені в роботі [26], з урахуванням зауважень [27]. Звідси отримаємо, що сторона трикутника має становити 40,4 мм. Отримано залежність параметра матриці розсіювання S_{11} від частоти (рис. 5). Видно, найкраще узгодження

анени із фідером живлення спостерігається поблизу частоти 2,4 ГГц при -5,4323 дБ.

Досліджено характеристики випромінювання антени, що розрахована на частоту $f_{рез}=7$ ГГц. На рис. 6 наведена тривимірна діаграма спрямованості даної антени. Видно, що діаграма спрямованості має майже сферичну форму, що дозволяє успішно використовувати таку антену у якості випромінюючого модуля для організації бездротового каналу зв'язку між датчиком/сенсором та блоком керування. На рис. 7 наведено двовимірні діаграми спрямованості трикутної антени.

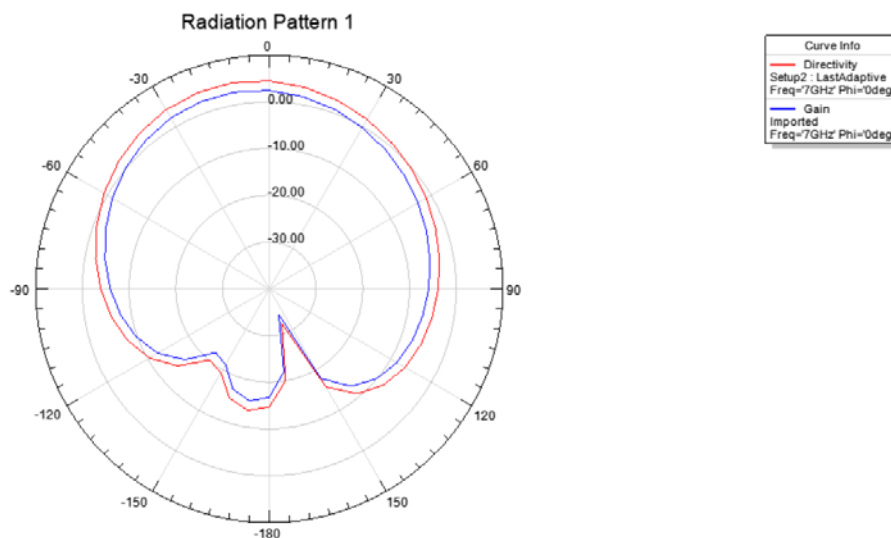


Рисунок 7. Двовимірна діаграма спрямованості

V. ВИСНОВКИ

Запропоновано оригінальну конструкцію трикутної мікросмужкової антени що живиться мікросмужковою лінією приєднаною середини сторони трикутника для використання в якості випромінюючого модуля системи енергетичного менеджменту будівель. Аналіз результатів математичного моделювання показує що даний спосіб живлення забезпечує хороше узгодження антени, параметр матриці розсіювання S_{11} , що має фізичний зміст модуля коефіцієнта відбиття на робочій частоті 7 ГГц має величину мінус 23,6776 дБ. Показано можливість роботи трикутної антени на робочих частотах 2,4 та 7 ГГц. Розрахована тривимірна та двовимірна діаграма спрямованості трикутної мікросмужкової антени забезпечує майже рівномірне випромінювання в довільних напрямках. Це дозволяє практично застосовувати такий тип випромінюючого модуля для організації бездротового зв'язку між давачами (сенсорами), що контролюють енергетичні параметри в приміщенні (і поблизу нього), та блоком керування системи енергетичного менеджменту або блоком керування системи розумний дім.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Jang, H. Design and implementation of IoT-based HVAC and lighting system for energy saving / H. Jang, B. Kang, C. Keonhee, K. Jang, S. Park // Proc. of MATEC Web of Conferences. - 2019. - pp. 02012. DOI: 10.1051/mateconf/201926002012
- [2] Naqbi, Al A. Building energy management systems using the Internet of Things: systematic literature review / A. Al Naqbi, S. S. Alyieliely, M. Abu Talib, Q. Nasir, M. Bettayeb, C. Ghenai // Proceeding of International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). - 2021. - pp. 1-7. DOI: 10.1109/ISNCC52172.2021.9615641
- [3] Dhanalakshmi, S. IoT based indoor air quality and smart energy management for HVAC system / S. Dhanalakshmi, M. Poongothai, K. Sharma // Procedia Computer Science. - 2020. - pp. 1800-1809. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.193
- [4] Vishwakarma, S. K. Smart energy efficient home automation system using IoT / S. K. Vishwakarma, P. Upadhyaya, B. Kumari, A. K. Mishra // Proceeding of 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)/ 2019. - pp. 1-4. DOI: 10.1109/IoT-SIU.2019.8777607
- [5] Chen, Y.-Y. Design and implementation of cloud analytics-assisted smart power meters considering advanced artificial intelligence as edge analytics in demand-side management for Smart Homes / Y.-Y. Chen, Y.-H. Lin, C.-C. Kung, M.-H. Chung, I.-H. Yen // Sensors. - 2019. - 19(9). - pp. 2047. DOI: 10.3390/s19092047
- [6] Monteiro, V. Operation modes for the electric vehicle in Smart Grids and Smart Homes: present and proposed modes / V. Monteiro, J. G. Pinto, J. L. Afonso // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - 2016. - Vol. 65(3). - pp. 1007-1020. DOI: 10.1109/TVT.2015.2481005
- [7] Rischke, J. 5G campus networks: a first measurement study / J. Rischke, P. Sossalla, S. Itting, F. H. P. Fitzek, M. Reisslein // IEEE Access. - 2021. - vol.9. - 2021. - pp. 121786-121803. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3108423
- [8] Korolev, N. Analytical model of multi-link operation in saturated heterogeneous Wi-Fi 7 networks / N. Korolev, I. Levitsky, E. Khorov // IEEE Wireless Communications Letters. - 2022. - vol. 11(12). - pp. 2546-2549.

- DOI: 10.1109/LWC.2022.3207946
- [9] Damacharla, P. Common metrics to benchmark human-machine teams (HMT): a review / P. Damacharla, A. Y. Javaid, J. J. Gallimore, V. K. Devabhaktuni // IEEE Access. - 2018. - vol. 6. - pp. 38637-38655.
DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2853560
- [10] Hassan, Q. F. Introduction to the Internet of Things / Q. F. Hassan. Internet of Things A to Z: Technologies and Applications. IEEE, 2018. - 50 p.
DOI: 10.1002/9781119456735.ch1
- [11] Osamy, W. ADSDA: adaptive distributed service discovery algorithm for Internet of Things based mobile wireless sensor networks / W. Osamy, A. M. Khedr, A. Salim // IEEE Sensors Journal. 2019. - vol.19(22). - pp. 10869-10880.
DOI: 10.1109/JSEN.2019.2930589
- [12] Lee, K.-Y. Case analysis on energy saving improvement of commercial air conditioning systems / K.-Y. Lee, Y.-M. Chu, C.-C. Chen, C.-L. Tsai, S.-J. Lou // Proceeding of. IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE). - 2019. - pp.1-6.
DOI: 10.1109/ECICE47484.2019.8942775
- [13] Thongkaew, S. IoT for energy saving of split-type air conditioner by controlling supply air and area temperature / S. Thongkaew, C. Charitkuan // Proceeding of 22nd International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC). - 2018. - pp.1-4. DOI: 10.1109/ICSEC.2018.8712656
- [14] Tastan, M. An Internet of Things based air conditioning and lighting control system for Smart Home / M. Tastan, H. Gökozan // American Scientific Research Journal for Engineering Technology and Sciences/ - 2018. - pp. 181-189.
- [15] Murthy, K. S. IoT-Based light intensity controller / K. S. Murthy, P. Herur, B. R. Adithya, H. Lokesh // Proceeding of International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA). - 2018. - pp. 455-460.
DOI: 10.1109/ICIRCA.2018.8597416
- [16] Gupta, A. K. IOT based electrical device surveillance and control system / A. K. Gupta, R. Johari // Proceeding of 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages. - 2019. - pp. 1-5. DOI: 10.1109/IoT-SIU.2019.8777342
- [17] Intarungsee, I. Intelligent Internet of Things using artificial neural networks and Kalman filters for energy management systems / I. Intarungsee, P. Thararak, P. Jirapong, K. Pengwon, S. Kaewwong // Proceeding of International Electrical Engineering Congress (iEECON). - 2022. - pp. 1-5.
DOI: 10.1109/iEECON53204.2022.9741649
- [18] Bhatnagar, H. V. Implementation model of Wi-Fi based Smart Home system / H. V. Bhatnagar, P. Kumar, S. Rawat, T. Choudhury // Proceeding of International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE). - 2018. - pp. 23-28.
DOI: 10.1109/ICACCE.2018.8441703
- [19] Song, E. Y. A methodology for modeling interoperability of Smart Sensors in Smart Grids / E. Y. Song, G. J. FitzPatrick, K. B. Lee, E. Griffor // IEEE Transactions on Smart Grid. - 2022. - vol.13. - pp.555-563.
DOI: 10.1109/TSG.2021.3124490
- [20] Марго, В.І. Комп'ютерне моделювання випромінювального модуля системи моніторингу сонячної електростанції / В.І. Марго, С.В. Плаксін // Відновлювальна енергетика. - 2021. - т.64. №2. - С. 29-37.
doi: 10.36296/1819-8058.2021.2(65).29-37
- [21] Morello, R. A smart power meter to monitor energy flow in Smart Grids: the role of advanced sensing and IoT in the Electric Grid of the future / R. Morello, C. De Capua, G. Fulco, S. C. Mukhopadhyay // IEEE Sensors Journal. - 2017. - vol.17(23). - pp. 7828-7837.
DOI: 10.1109/JSEN.2017.2760014
- [22] Haque, M. E. IoT based home automation system with customizable GUI and low cost embedded system / M. E. Haque, M. R. Islam, M. T. F. Rabbi, J. I. Rafiq // Proceeding of International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI). - 2019. - pp.1-4.
DOI: 10.1109/STI47673.2019.9068035
- [23] Ramani, U. IoT based energy management for Smart Home / U. Ramani, S. S. Rumar, T. Santhoshkumar, M. Thilagaraj // Proceeding of 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC). - 2019. - pp. 533-536.
DOI: 10.1109/ICPEDC47771.2019.9036546
- [24] Singh, H. K. A step towards home automation using IOT / H. K. Singh, S. Verma, S. Pal, K. Pandey // Proceeding of Twelfth International Conference on Contemporary Computing (IC3). - 2019. - pp. 1-4. DOI: 10.1109/IC3.2019.8844945
- [25] Harini, V. Performance analysis of an extended Sierpinski gasket fractal antenna for mm wave femtocells applications / V. Harini, M. V. Sairam, R. Madhu // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). - 2020. - vol. 8. - P. 1-9. DOI: 10.1007/s11277-021-08289-3
- [26] Vallappil, A. K. Metamaterial-inspired electrically compact triangular antennas loaded with CSRR and 3×3 cross-slots for 5G indoor distributed antenna systems / A. K. Vallappil, B. A. Khawaja, M. K. A. Rahim, M. N. Iqbal, H. T. Chattha // Micromachines. - 2022. - Vol. 13. - P. 1-9.
DOI: 10.3390/mi13020198
- [27] Pozar, D.M. Microwave Engineering, 3rd ed. N.Y.: Wiley, 2005. 736 p.
DOI: 10.4236/ojapps.2022.125044

Стаття надійшла до редакції 20.11.2022

THE STUDY OF THE RADIATING MODULE OF THE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM OF BUILDINGS

- MAGRO V.I. PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Security and Telecommunications of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: magrov@i.ua;
- PLAKSIN S.V. Dr. Sc., senior researcher, Head of the Department of Control Systems of the Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, e-mail: svp@westa-inter.com

Purpose. *Improving the toolkit of interaction between sensors and the building control system using a triangular microstrip antenna.*

Methodology. *Mathematical modeling by the method of finite differences in the time domain.*

Findings. *The proposed technical solution consists in choosing the optimal design of the radiating module in the form of a triangular microstrip antenna, by means of mathematical modeling, the values of the geometric dimensions of the triangle, the thickness of the dielectric layer and the value of its dielectric constant, the overall dimensions of the radiating module, which ensure optimal coordination of the antenna with the power feeder in the form of a microstrip line. The developed computer model of the triangular microstrip antenna using the finite-difference method in the time domain allows conducting research on the parameters of this antenna that provide stable wireless communication between the system of sensors and the home automation control unit. The condition for increasing the degree of matching the impedance of the antenna and the supply line is the choice of the method of powering the antenna. It was established that the most optimal way of feeding a triangular antenna is the method of connecting the microstrip line to the middle of the side of the triangle, compared to the way of connecting the power line to the top of the triangle. The width of the microstrip power line was optimized according to the criterion of minimizing the module of the reflection coefficient at the antenna input. A study of the degree of matching the impedance of the antenna at operating frequencies of 2,4 and 7 GHz was carried out. At a frequency of 7 GHz, the magnitude of the reflection coefficient module is -23,6776 dB. The three-dimensional and two-dimensional radiation patterns of this antenna are calculated. The radiation pattern has an almost spherical shape, that is, it allows placing the radiating module in any orientation relative to the earth's surface. This allows the triangular microstrip antenna to be used as a radiating module of the building energy management system and the smart home system.*

Originality. *The study of the ways of feeding the triangular microstrip antenna allows to find the optimal coupling of the antenna with the power line, which ensures the formation of radiation characteristics that ensure effective interaction between the sensors and the building's energy management control system.*

Practical value. *The radiation characteristics of a triangular microstrip antenna obtained as a result of the study make it possible to use it to organize a wireless communication channel in a 4% operating frequency band.*

Key words: *energy management, control system, smart home, radiating module, triangular microstrip antenna, reflection coefficient module, radiation characteristics*

REFERENCE

- [1] Jang H., Kang B., Keonhee C., Jang K., Park S. (2019). Design and implementation of IoT-based HVAC and lighting system for energy saving. Proceeding of MATEC Web of Conferences, 02012. DOI: 10.1051/mateconf/201926002012
- [2] Naqbi Al A., Alyieliely S. S., Talib M. Abu, Nasir Q., Bettayeb M., Ghenai C. (2021). Building energy management systems using the Internet of Things: systematic literature review. Proceeding of International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), 1-7. DOI: 10.1109/ISNCC52172.2021.9615641
- [3] Dhanalakshmi S., Poongothai M., Sharma K. (2020). IoT based indoor air quality and smart energy management for HVAC system. *Procedia Computer Science*, 1800-1809. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.193
- [4] Vishwakarma S. K., Upadhyaya P., Kumari B., Mishra A. K. (2019). Smart energy efficient home automation system using IoT. Proceeding of 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU), 1-4. DOI: 10.1109/IoT-SIU.2019.8777607
- [5] Chen Y.-Y., Lin Y.-H., Kung C.-C., Chung M.-H., Yen I.-H. (2019). Design and implementation of cloud analytics-assisted smart power meters considering advanced artificial intelligence as edge analytics in demand-side management for Smart Homes. *Sensors*, 19(9), 2047. DOI: 10.3390/s19092047
- [6] Monteiro V., Pinto J. G., Afonso J. L. (2016). Operation modes for the electric vehicle in Smart Grids and Smart Homes: present and proposed modes. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(3), 1007-1020. DOI: 10.1109/TVT.2015.2481005
- [7] Rischke J., Sossalla P., Itting S., Fitzek F. H. P., Reisslein M. (2021). 5G campus networks: a first

- measurement study. *IEEE Access*, 9, 121786-121803. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3108423
- [8] Korolev N., Levitsky I., Khorov E. (2022). Analytical model of multi-link operation in saturated heterogeneous Wi-Fi 7 networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, (12), 2546-2549. DOI: 10.1109/LWC.2022.3207946
- [9] Damacharla P., Javaid A. Y., Gallimore J. J., Devabhaktuni V. K. (2018). Common metrics to benchmark human-machine teams (HMT): a review. *IEEE Access*, 6, 38637-38655. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2853560
- [10] Hassan Q. F. (2018). Introduction to the Internet of Things. *Internet of Things A to Z: Technologies and Applications*. IEEE, 50. DOI: 10.1002/9781119456735.ch1
- [11] Osamy W., Khedr A. M., Salim A. (2019). ADSDA: adaptive distributed service discovery algorithm for Internet of Things based mobile wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 9(22), 10869-10880. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2930589
- [12] Lee K.-Y., Chu Y.-M., Chen C.-C., Tsai C.-L., Lou S.-J. (2019). Case analysis on energy saving improvement of commercial air conditioning systems. *Proceeding of IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, 1-6. DOI: 10.1109/ECICE47484.2019.8942775
- [13] Thongkaew S., Charitkuan C. (2018). IoT for energy saving of split-type air conditioner by controlling supply air and area temperature. *Proceeding of 22nd International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 1-4. DOI: 10.1109/ICSEC.2018.8712656
- [14] Tastan M., Gökozan H. (2018). An Internet of Things based air conditioning and lighting control system for Smart Home. *American Scientific Research Journal for Engineering Technology and Sciences*, 181-189.
- [15] Murthy K. S., Herur P., Adithya B. R., Lokesh H. (2018). IoT-based light intensity controller. *Proceeding of International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 455-460. DOI: 10.1109/ICIRCA.2018.8597416
- [16] Gupta A. K., Johari R. (2019). IOT based electrical device surveillance and control system. *Proceeding of 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages*, 1-5. DOI: 10.1109/IoT-SIU.2019.8777342
- [17] Intarungsee I., Thararak P., Jirapong P., Pengwon K., Kaewwong S. (2022). Intelligent Internet of Things using artificial neural networks and Kalman filters for energy management systems. *Proceeding of International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 1-5. DOI: 10.1109/iEECON53204.2022.9741649
- [18] Bhatnagar H. V., Kumar P., Rawat S., Choudhury T. (2018). Implementation model of Wi-Fi based Smart Home system. *Proceeding of International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE)*, 23-28. DOI: 10.1109/ICACCE.2018.8441703
- [19] Song E. Y., FitzPatrick G. J., Lee K. B., Griffor E. (2022). A methodology for modeling interoperability of Smart Sensors in Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(1), 555-563. DOI: 10.1109/TSG.2021.3124490
- [20] Magro V.I., Plaksin S.V. (2021). Komp'yuterne modelyuvannya vprominyuval'noho modulya systemy monitorynhu sonyachnoyi elektrostantsiyi [Computer modeling of the radiation module of the solar power plant monitoring system]. *Vidnovlyuval'na enerhetyka*. 64, 2, 29-37. (in Ukrainian) DOI: 10.36296/1819-8058.2021.2(65).29-37
- [21] Morello R., Capua C. De, Fulco G., Mukhopadhyay S. C. (2017). A smart power meter to monitor energy flow in Smart Grids: the role of advanced sensing and IoT in the Electric Grid of the future. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 7828-7837. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2760014
- [22] Haque M. E., Islam M. R., Rabbi M. T. F., J. I. Rafiq M. T. F. (2019). IoT based home automation system with customizable GUI and low cost embedded system. *Proceeding of International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI)*, 1-4. DOI: 10.1109/STI47673.2019.9068035
- [23] Ramani U., Rumar S. S., Santhoshkumar T., Thilagaraj M. (2019). IoT based energy management for Smart Home. *Proceeding of 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, 533-536. DOI: 10.1109/ICPEDC47771.2019.9036546
- [24] Singh H. K., Verma S., Pal S., Pandey K. (2019). A step towards home automation using IOT. *Proceeding of Twelfth International Conference on Contemporary Computing (IC3)*, 1-4. DOI: 10.1109/IC3.2019.8844945
- [25] Harini V., Sairam M. V., Madhu R. (2020). Performance analysis of an extended Sierpinski gasket fractal antenna for mm wave femtocells applications. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8, 1-9. DOI: 10.1007/s11277-021-08289-3
- [26] Vallappil A. K., Khawaja B. A., Rahim, M. N. Iqbal M. K. A., Chattha H. T. (2022). Metamaterial-inspired electrically compact triangular antennas loaded with CSRR and 3×3 cross-slots for 5G indoor distributed antenna systems. *Micromachines*, 13, 1-9. DOI: 10.3390/mi13020198
- [27] Pozar, D.M. (2005). *Microwave Engineering*. N.Y.: Wiley, 736. DOI: 10.4236/ojapps.2022.125044

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПОРТФЕЛЯМИ ПРОЄКТІВ 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 викладач кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: deynega.larisa@gmail.com;
- ЛАКТИОНОВ В.В. студент кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: wyknait@gmail.com

Мета роботи. Розробка програмного комплексу, що базується на методах прийняття рішень для управління портфелями проєктів енергозбереження на енергоємних підприємствах.

Методи дослідження. Для вирішення проблеми управління портфелями проєктів була обрана портфельна теорія фінансових інвестицій Марковіца, яка дозволяє здійснити найбільш вигідний розподіл ризику портфелю та виконати оцінювання прибутку за допомогою методів оптимізації. В поєднанні з даною теорією було вирішено використовувати методи пошуку максимального коефіцієнта Шарпа, а також мінімальної волатильності за пакетом даних випадково згенерованих портфелів.

Отримані результати. В результаті виконаної роботи було розроблено програмну систему, яка має у своєму функціоналі автоматичне завантаження пакету даних обраних акцій за вказаний період часу з електронного ресурсу, генерує випадковий портфель та виконує його оптимізацію за допомогою максимізації коефіцієнту Шарпа та мінімізації волатильності портфелю. Також програма має можливість відображати результати оптимізації згенерованого портфелю у вигляді таблиць та графіків.

Система підтримки прийняття рішень для управління портфелями проєктів енергозбереження була розглянута через її узагальнення до методів оптимізації інвестиційних портфелів, але з врахуванням специфіки предметної області.

Програмний комплекс був протестований на наборі даних цін акцій енергоємних підприємств. Отримані в результаті роботи системи графічні дані та таблиці дозволяють користувачу програми в повному обсязі оцінити створений портфель проєкту енергозбереження.

Наукова новизна. Розроблена програмна система поєднує одразу декілька методів, а саме: методи оптимізації інвестиційного портфелю за портфельною теорією Марковіца, методи пошуку максимального коефіцієнта Шарпа та методи знаходження мінімальної волатильності. Дане рішення дозволяє використовувати систему для розв'язання широкого спектру завдань.

Практична цінність. Виконана розробка дозволяє зручно виконувати оптимізацію інвестиційних портфелів для різноманітних активів, що дає змогу використовувати розробку для управління портфелями проєктів енергозбереження на енергоємних підприємствах. Також, система може бути основою для подібних розробок.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень; управління портфелями; модель Гаррі Марковіца; коефіцієнт Шарпа; енергозбереження; енергоємні підприємства.

I. ВСТУП

Енергозбереження – це реалізація організаційних, правових, технічних, технологічних, економічних та інших заходів, спрямованих на зменшення обсягу використовуваних енергетичних ресурсів за збереження відповідного корисного ефекту від їх використання (у тому числі обсягу виробленої продукції, виконаних робіт, наданих послуг). Це поняття включає як раціональне використання енергетичних ресурсів, так і їх ефективне споживання.

Енергозбереження, як не дивно, – це найдешевше джерело енергії. З тих пір, як набула популярності гіпотеза про зв'язок між глобальною зміною клімату і збільшенням концентрації парникових газів в атмосфері, країни усвідомили необхідність перешкодити цьому процесу. Уряди спільно з громадськими організаціями та великими компаніями різних галузей намагаються зменшити кількість викидів цих речовин в атмосферу. Реалізується багато проєктів зі створення екологічно чистих технологій виробництва, в першу чергу в частині генерації енергії, які могли б успішно

конкурувати з найбільш «брудними», але недорогими вугільними електростанціями. Проте велика увага приділяється також розвитку енергозберігаючих технологій, особливо в найбільш енергоємних галузях виробництва сталі та алюмінію.

Енергозберігаючі заходи на промислових підприємствах спрямовані на зменшення витрат енергоресурсів на виробництво продукції. Управління енергозбереженням здійснюється шляхом реалізації промислових проєктів, метою яких є досягнення максимальної енергоефективності і полягає в знаходженні з множини можливих варіантів управління при заданих обмеженнях і з урахуванням зовнішніх впливів таких допустимих впливів, які матимуть максимальну ефективність.

Оптимальне управління проєктами енергозбереження в промисловості починається з доцільного вибору на етапах проєктування та впровадження заходів енергозбереження та енергоефективних технологій, які є поєднанням методів, операцій, прийомів та етапів, послідовне виконання яких забезпечує вирішення поставленої задачі енергозбереження [1].

Ефективне використання енергетичних ресурсів потрібно при їх видобутку, виробництві, переробці, транспортуванні, зберіганні та споживанні, створенні та використанні енергоефективних технологій.

Нині процеси управління проєктами повсюдно використовують у всіх галузях світового господарства. Широке поширення процесів управління проєктами показує, що правильне застосування підвищує ймовірність успішної реалізації більшості виконуваних проєктів. При цьому успішність процесного підходу в здійсненні енергозбереження в промислових проєктах має базуватись на аспектах енергоефективності в управлінні проєктом: енергоефективності процесів проєкту та енергоефективності результатів проєкту.

Інвестиційні проєкти з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності, як правило, є довгостроковими та низькорентабельними. Крім того, причини недостатніх інвестицій полягають у наявності багатьох бар'єрів для використання технологій енергозбереження, які пов'язані з такими факторами:

- 1) низьким пріоритетом проблем енергозбереження та екології;
- 2) складнощі з доступом до фінансування;
- 3) проблемою конфлікту інтересів;
- 4) фінансовими проблемами, серед яких такі: початкові капіталовкладення, схильність до ризику, неадекватність існуючих фінансових механізмів для реалізації проєктів енергозбереження.

Інвестиції у підвищення енергоефективності можуть економити енергоресурси безпосередньо через скорочення споживання енергії в кінцевих

користувачів і побічно шляхом скорочення обсягу палива, необхідного для перетворення та транспортування енергії для кінцевого споживання. Наприклад, зниження споживання електроенергії домогосподарствами сприяє скороченню обсягу палива, споживаного генераторами покриття навантаження. Чим менше палива буде використано генераторами, тим менше палива необхідно видобути та транспортувати (по трубопроводах, залізницях або автошляхах) і тим менше енергії буде використано на видобуток цього палива.

Системи підтримки прийняття рішень (СППР) – це інтерактивні комп'ютерні системи, які допомагають користувачам приймати рішення та робити вибір. Завдяки спрощенню комплексного аналізу даних і забезпеченню різноманітних форматів презентацій, користувачі СППР можуть приймати більш обґрунтовані рішення. Таким чином, основна мета СППР полягає в тому, щоб надати необхідну інформацію особі, яка приймає рішення, щоб допомогти йому або їй краще зрозуміти середовище прийняття рішень і доступні альтернативи [2].

Системи підтримки прийняття рішень, засновані на моделях оптимізації, можуть використовуватися в процесі вибору оптимального портфелю.

Управління портфелями проєктів енергозбереження на енергоємних підприємствах напряму пов'язано з методами оптимізації витрат на ці проєкти. Тому для розв'язання подібних задач доречно використовувати методи оптимізації інвестиційних портфелів, які влучно відображають специфіку та методіку вирішення типових завдань.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У роботі [1] розглядається тема вдосконалення управління енергоефективністю та енергозбереженням на підприємствах машинобудування. Там наголошується, що управління енергозбереженням здійснюється шляхом реалізації промислових проєктів, метою яких є досягнення максимальної енергетичної ефективності. Оцінка ефективності управління проєкту проводиться в результаті контролю та вимірювання енергозбереження на кожному етапі функціонування проєкту за показником, рівним співвідношенню між досягнутими або очікуваними результатами управління і витраченими ресурсами на формування і функціонування цих дій, що управляють. Оптимізація управління проєктами енергозбереження спрямована на досягнення максимальної ефективності проєкту і полягає у знаходженні з безлічі можливих варіантів управління за заданих обмежень і з урахуванням зовнішніх впливів таких допустимих керуючих впливів, які матимуть максимальні показники ефективності.

У роботі [3] запропоновано структуру комп'ютерної СППР при управлінні грошовими

потоками проєктів підприємства, що має в основі агентну імітаційну модель динамічного аналізу процесів управління ресурсами проєктів підприємства, яка здійснює аналіз ресурсного забезпечення проєктів з урахуванням різних варіантів фінансування.

У роботі [4] наводяться результати наукових досліджень у галузі управління ризиками при виборі інвестиційних проєктів у телекомунікаційній сфері із застосуванням СППР. В основі лежать методи, що ґрунтуються на дисконтованих оцінках та методах, заснованих на облікових оцінках.

У роботі [5] запропоновано СППР для розробки та управління проєктами в умовах невизначеності на основі моделювання за методом Монте-Карло та еволюційних алгоритмів.

У роботі [6] описано СППР, яка оптимізує вартість ресурсів при оцінці рентабельності інвестиційних проєктів у галузі біодизельного палива.

У роботі [7] розглядається розробка автоматичної системи оцінки, що ґрунтується на методі нечіткої логіки, для підтримки найкращого вибору заходів з енергозбереження, які застосовуватимуться до існуючих будівель. Інструмент був розроблений з урахуванням зимового опалення, з урахуванням деяких елементів конструкції будівлі, що захищають, і успішно пройшов валідацію для підтвердження ефективності представленої методології.

У дослідженні [8] запропонована гнучка та розширювана СППР, яка: одночасно враховує всі різні критерії для визначення найбільш прийняттого портфелю проєктів, використовує найкращі характеристики існуючих методів шляхом декомпозиції перетворення процесу у гнучку та логічну серію дій із застосуванням найбільш відповідних методів на кожному етапі.

У роботі [9] розглядаються методи та інформаційні технології управління портфелями проєктів енергозбереження на металургійних підприємствах. Представлена програмна реалізація системи оптимізації фінансового портфелю дає змогу використовувати її для будь-яких активів.

У роботі [10] запропоновано гібридну інтелектуальну систему, яка вирішує досить успішне інвестування в акції, що утворюють портфель. Ця система складається з двох основних частин: перша відповідає за купівлю та продаж акцій, управління портфелем і моніторинг придбаних акцій, а друга частина відповідає за вибір найкращих акцій для включення їх в портфель.

У роботі [11] було запропоновано модель відбору портфелю, яка паралельно використовує два типи даних: технічні та фундаментальні дані. Створюючи експертну систему для кожного виду даних, оцінка прибутку та ризику для кожної акції для

кожного короткострокового та довгострокового обсягу. Після цього були отримані вподобання користувачів, і шляхом агрегування з оціночними значеннями було створено унікальне портфелю, яке могло б задовольнити вподобання користувачів.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка програмного комплексу, що базується на методах прийняття рішень для управління портфелями проєктів енергозбереження на енергоємних підприємствах.

На даний час вдосконалення управління енергоефективністю та енергозбереженням є одним із пріоритетних напрямів. Тому що від правильного та раціонального використання енергоресурсів залежить прибуток підприємств, а також екологія кожної країни.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У реальних умовах вибір портфелю зазвичай є складною проблемою. Хоча за допомогою багатьох критеріїв можна вивчити та класифікувати область рішення, у багатьох випадках деякі критерії відсутні або їх ваги є нереалістичними. З іншої точки зору можна помітити, що всі інвестори зацікавлені отримати більше, але не всі повністю задоволені. Тож, мета в цій сфері полягає не в тому, щоб знайти найкраще, а скоріше раціональне рішення. Передбачається, що інвестор має певний набір установок щодо бажаності різного рівня багатства. За деяких обставин цінні папери можна класифікувати за класами та запитати, як інвестор розподіляє між ними [12].

Концепція інвестиційного портфелю полягає в тому, щоб поєднати різні цілі інвестування, щоб уникнути концентрації занадто великого ризику на одній цілі з метою розподілу загального інвестиційного ризику. Будь-яку комбінацію двох або більше цінних паперів або активів можна назвати інвестиційним портфелем. За півстоліття модель середньої дисперсії Марковіца [13] стала загальнозрозумілою технікою в галузі інвестицій.

Гаррі Марковіц (1952) зробив великий крок у виборі портфелю, представивши модель середньої дисперсії [13]. Модель все ще вважається дебютом для сучасної теорії вибору портфелю та стверджує, що ключову інформацію про портфель можна отримати з трьох вимірювань: очікуваної прибутковості (взято як середнє арифметичне), стандартних відхилень і кореляції між цими прибутками [14].

Визначаючи прибутковість інвестицій як середнє значення прибутків цінних паперів, а інвестиційний ризик як відхилення від середнього значення, Марковіц математично сформулював свої моделі двома способами: мінімізуючи дисперсію для даного

очікуваного значення або максимізуючи очікуване значення для даного відхилення. Модель дає точне рішення, коли вона має коваріаційну матрицю між усіма курсами акцій та оцінками прибутку. Незважаючи на те, що він має ризик і прибуток паралельно, він може досягти межі рішення, змінивши толерантність інвестора до ризику.

Отже, для управління портфелями проєктів енергозбереження на енергоємних підприємствах було вирішено взяти за приклад набір даних з щоденною скоригованою ціною закриття кожної акції за останні п'ять років для чотирьох ливарних підприємств:

- Steel Dynamics Inc. (STLD);
- Nucor Corporation (NUE);
- United States Steel Corporation (X);
- Cleveland-Cliffs Inc. (CLF).

Дані були взяті з ресурсу finance.yahoo.com [15] за допомогою бібліотеки «pandas_datareader» [16].

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

Date	STLD	NUE	X	CLF
2017-10-06	32.014229	49.295979	25.139444	6.723198
2017-10-09	31.430050	48.637531	24.145441	6.439120
2017-10-10	31.536276	48.611191	24.106838	6.448588
2017-10-11	31.846058	50.340725	24.319157	6.410711
2017-10-12	32.076180	50.410954	24.666565	6.476996
...
2022-09-30	70.949997	106.989998	18.120001	13.470000
2022-10-03	75.389999	114.330002	19.389999	14.620000
2022-10-04	78.019997	119.309998	20.430000	15.470000
2022-10-05	77.830002	117.849998	20.190001	15.410000
2022-10-06	77.870003	119.300003	19.750000	15.100000

[1259 rows x 4 columns]

Рисунок 1. Щоденна ціна на акції обраних компаній

На рис. 2 зображений графік, згенерований на основі попередньо отриманих даних. На ньому видно як ціна кожної акції змінювалася протягом заданого періоду часу.

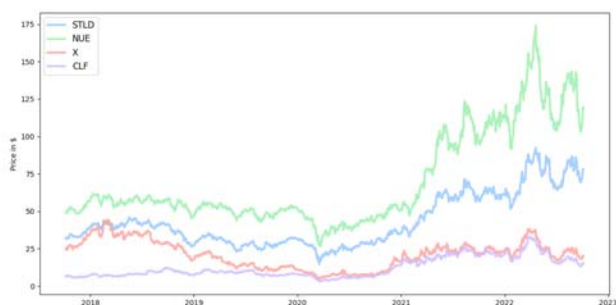


Рисунок 2. Графік змін цін акцій

За графіком видно, що ціна на акції компанії

Nucor Corporation найвища, серед усіх, а найнижча у Cleveland-Cliffs Inc. У 2020 році спостерігається колективне знецінення акцій з подальшим різким укріпленням у 2021 році.

Наступним графіком – є щоденна дохідність (відсоткова зміна порівняно з попереднім днем). На рис. 3 зображений графік щоденної прибутковості замість фактичних цін, на якому можна побачити волатильність (мінливість) акцій.

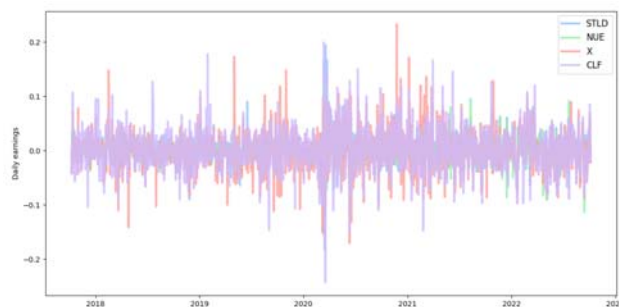


Рисунок 3. Щоденна дохідність

На графіку виділяється компанія Cleveland-Cliffs Inc, у якої багато позитивних сплесків і багато негативних, один, навіть, дуже негативний. United States Steel Corporation має найвищий позитивний сплеск. Компанію Nucor Corporation можна виділити, як найбільш урівноважену, після Steel Dynamics Inc. Тобто, можна зробити висновок, що Nucor Corporation найстабільніша серед всіх, а Cleveland-Cliffs Inc – найбільш ризикована.

Для генерації випадкових портфельів використовуються чотири акції. Спочатку розподіляється бюджет за кожною акцією у портфелі. Якщо загальний бюджет дорівнює 1, 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 Nucor Corporation дорівнює 0,5, це означає, що для цієї компанії виділяється 50% бюджету.

Згенерувавши 30 тисяч портфельів з випадковими вагами, призначеними для кожної акції, розраховується прибутковість, волатильність, коефіцієнт Шарпа та ваги, і щоб зробити це як розрахунок у річному обчисленні, береться до уваги 252 дні як кількість торгових днів на рік.

Стандартне відхилення портфелю розраховується 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 використовувати 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 отримується частина квадратного кореня у вихідній формулі. Як і у випадку з прибутковістю в річному обчисленні, береться 252 торгові дні, щоб розрахувати середньорічне стандартне відхилення портфелю.

Наступним 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 [17].

Коефіцієнт визначає, скільки надлишкового прибутку отримується за додаткову волатильність, яка відчувається при володінні більш ризикованим активом. Коефіцієнт Шарпа можна виразити такою формулою:

$$S = \left(\frac{R_p - R_f}{\sigma_p} \right),$$

де R_p - прибутковість активу,

R_f - прибутковість безризикової інвестиції,

σ_p - стандартне відхилення прибутковості активу [17].

Після генерації випадкових портфельів отримується наступні значення: прибутковість портфелю, волатильність портфелю, коефіцієнт Шарпа та ваги для відповідного результату.

Для знаходження ефективної межі використовується функція оптимізації пакету Scipy – обчислюється найбільш ефективний портфель для заданої цільової прибутковості, береться діапазон цільового прибутку і обчислюється ефективний портфель для кожного рівня прибутковості.

Варто зазначити, що не можна виділити в цілому понад 100% бюджету. З цього випливає що будь-яка випадкова вага має бути включно між 0 і 1. Не можна вказати негативний розподіл бюджету на акцію або більше 100% розподілу на акцію.

Для визначення оптимізації для розрахунку портфелю з мінімальною волатильністю проводиться мінімізація цільової функції, використовуючи різні ваги з вище описаними обмеженнями.

На рис. 4 можливо побачити як розподіляється

бюджет всередині згенерованих портфельів з максимальним розподілом за коефіцієнтом Шарпа та за мінімальним розподілом волатильності.

The maximum distribution of the portfolio according to the Sharpe ratio

Annual profit: 0.28
Annual volatility: 0.41

	STLD	NUE	X	CLF
allocation	30.78	51.41	0.06	17.74

Minimum volatility portfolio allocation

Annual profit: 0.25
Annual volatility: 0.39

	STLD	NUE	X	CLF
allocation	10.38	88.32	0.57	0.73

Рисунок 4. Максимальний та мінімальний розподіл

Для портфелю з більшим ризиком та вищою прибутковістю найкращу прибутковість із виправленням на ризик дає той, який має максимальний коефіцієнт Шарпа. У цьому сценарії виділяється значна частина Nucor Corporation та Steel Dynamics Inc і найменше – United States Steel Corporation.

У портфелі з мінімальним ризиком виділяється Nucor Corporation – більша частина бюджету виділяється на неї. Якщо звернутися до графіку щоденної прибутковості (рис. 3), видно, що Nucor Corporation – найменш волатильна акція з чотирьох, тому виділення великого відсотка цій компанії для портфелю з мінімальним ризиком має значний сенс.

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 портфелю з мінімальною волатильністю та відображає його зеленою зіркою на графіку. Усі випадково згенеровані портфельі нанесені на карту із застосуванням до них колірної картки на основі коефіцієнта Шарпа. Чим більш жовтий колір, тим вищий коефіцієнт Шарпа.

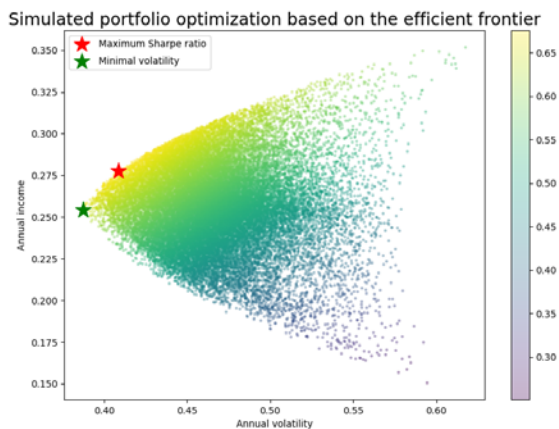


Рисунок 5. Імітована оптимізація портфелю на основі ефективної межі

На графіку випадково змодельованих портфельів бачимо, що він утворює форму дуги поверх згрупованих жовтих крапок. Ця лінія називається ефективною межею, тому що точки вздовж лінії дадуть 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 портфелю, шляхом моделювання безлічі можливих випадкових та вибору найкращих (або з мінімальним ризиком, або з максимальною прибутковістю з поправкою на ризик) портфельів.

Наступним кроком роботи програми – є зображення варіантів портфельів з максимальним коефіцієнтом Шарпа і мінімальною волатильністю з усіма випадково згенерованими портфельями, але цього разу не вибираються оптимальні із випадково згенерованих портфельів, а фактично обчислюються за допомогою функції пакету Scipy. Та будується ефективна лінія межі. Результати зображені на рис. 6 та рис. 7.

The maximum distribution of the Sharpe ratio portfolio

Annual profit: 0.28
Annual volatility: 0.41

	STLD	NUE	X	CLF
allocation	24.08	55.51	0.0	20.41

Minimum volatility portfolio allocation

Annual profit: 0.25
Annual volatility: 0.39

	STLD	NUE	X	CLF
allocation	9.8	90.2	0.0	0.0

Рисунок 6. Максимальний та мінімальний розподіл

Calculated portfolio optimization based on the efficient frontier

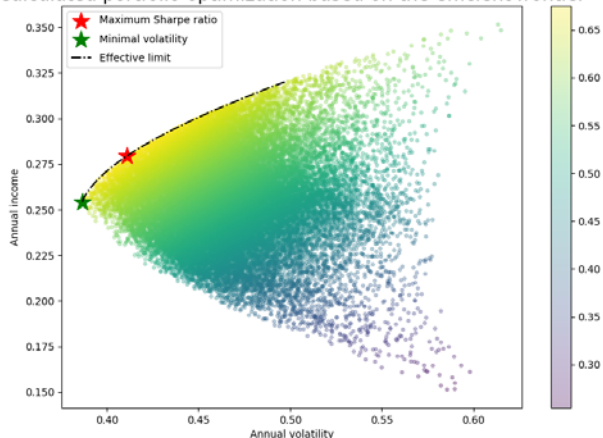


Рисунок 7. Розрахована оптимізація портфелю на основі ефективної межі

Отримано майже той самий результат, що при моделюванні з випадково згенерованими портфельями. Невелика відмінність полягає в тому, що функція оптимізації Scipy взагалі не виділяла будь-який бюджет для United States Steel Corporation в обох видах портфельів. А у портфельі з мінімальною волатильністю це виділяється бюджет для Cleveland-Cliffs Inc, як для найбільш ризикованої.

Замість того, щоб будувати кожен випадково згенерований портфель, можна нанести на графік (рис. 8) кожен окрему акцію з відповідними значеннями річної прибутковості та річного ризику 'кожної акції'. Таким чином, можливо побачити та порівняти як диверсифікація знижує ризик за рахунок оптимізації розподілу.

Як видно з наведеного на рис. 8 графіку та таблиці на рис. 9, найменший ризик у акцій Nucor Corporation і становить 0,39. Якщо є готовність взяти трохи більший ризик 0,43 для компанії Steel Dynamics Inc, можна досягти вищої прибутковості – 0,27, проти 0,25.

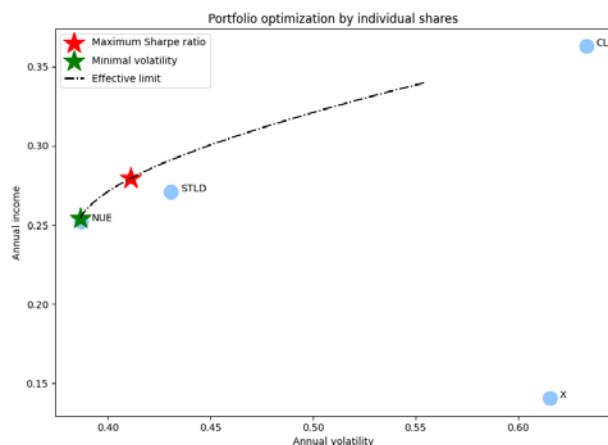


Рисунок 8. Оптимізація портфелю за індивідуальними акціями

Індивідуальна прибутковість акцій і волатильність

STLD : Annual profit 0.27 , Annual volatility: 0.43
NUE : Annual profit 0.25 , Annual volatility: 0.39
X : Annual profit 0.14 , Annual volatility: 0.62
CLF : Annual profit 0.36 , Annual volatility: 0.63

Рисунок 9. Максимальний, мінімальний розподіл та індивідуальні показники

Якщо взяти найвищий ризик 0,63 у компанії Cleveland-Cliffs Inc, то можна отримати найбільший прибуток – 0,36. А у компанії United States Steel Corporation за волатильністю 0,62 розрахований річний прибуток лише 0,14 – найменший серед всіх.

V. ВИСНОВКИ

У роботі було проаналізовано актуальну проблему енергоефективності на енергоємних

підприємствах. Виявилось, що ця тема дуже важлива для сьогодення.

Інвестування у підвищення енергоефективності призводить до скорочення витрат на енергію, покращення надійності постачання та зниження впливу на навколишнє середовище.

Незважаючи на це, багато реальних можливостей для більш високої енергоефективності не використовуються через небездоганне управління портфелями інвестицій в енергозбереження. Ці втрачені можливості призводять до численних витрат і мають особливий вплив на природу, що для сьогодення є точкою концентрації.

Після аналізу значної кількості публікацій було розроблено програмний комплекс, що базується на методах прийняття рішень, який може використовуватись для управління портфелями проектів енергозбереження на енергоємних підприємствах.

Розробка довела свою ефективність при знаходженні оптимального портфелю акцій компаній зі сфери ливарної промисловості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Веремеско, О. О. Оцінка енергоефективності підприємств машинобудування та розроблення проектів з її підвищення / О. О. Веремеско // Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія : Міжнародні економічні відносини та світове господарство. - 2018. - Вип. 19(1). - С. 43-46.
- [2] Weber, B. W. Financial DSS: Systems for supporting investment decisions. Handbook on Decision Support Systems 2 / Weber, B. W. // Springer Berlin Heidelberg. – 2008. - P. 419–442.
- [3] Кійко, С. Т. Система підтримки прийняття рішень при управлінні грошовими потоками проектів підприємства [Текст] / С. Т. Кійко // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. - 2014. - № 4 (68) - С. 145-149. – ISSN 1814-4225
- [4] Кравченко, Т. К. Системи підтримки прийняття рішень в оцінці ефективності інвестиційних проектів у телекомунікаційній сфері / Т. К. Кравченко // Прикладна інформатика. - 2014. - № 5 (53) - С. 119-132. – ISSN 1993-8314
- [5] Zhang, S. X. An Evolutionary Real Options Framework for the Design and Management of Projects and Systems with Complex Real Options and Exercising Conditions / S. X. Zhang, V. Babovic // Decision Support Systems. – 2011. – Vol. 51. – № 1. – P. 119–129.
- [6] Olteanu Alin Paul. A Decision Support System (DSS) for Project Management in the Biodiesel Industry / Alin Paul Olteanu // Informatica Economică. – 2011. – Vol. 15. – № 4. – P. 189–202.
- [7] Development of a Decisional Procedure Based on Fuzzy Logic for the Energy Retrofitting of Buildings / Barelli L., Belloni E., Bidini G., Buratti C.; Pinchi E.M. // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, 9318. – P. 6-12.
- [8] Lin, C. A fuzzy decision support system for strategic portfolio management / C. Lin, P.-J. Hsieh // In Decision Support Systems Vol. 38, Issue 3. – 2004. – P. 383–398.
- [9] Дубровін В.І. Енергозбереження на енергоємних підприємствах / В.І. Дубровін, Л.Ю. Дейнега, В.В. Лактіонов // Електротехніка та електроенергетика. – 2022. – No2. – С. 58-68.
- [10] Casanova, Isidoro J. Portfolio Investment Decision Support System Based on a Fuzzy Inference System / Isidoro J. Casanova // Studies in Computational Intelligence. – 2012. – P. 184-187.
- [11] Zarei, H. A New Fuzzy Dss/Es For Stock Portfolio Selection Using Technical And Fundamental Approaches In Parallel / H. Zarei, M. H. Fazel Zarandi, M. Karbasian // Zenodo. – 2009. – P. 1-4.
- [12] Breen, W. Specific versus General Models of Portfolio Selection / W. Breen // Oxford Economic Papers. – 1968, November. – P. 361- 368.
- [13] Markowitz, H. Portfolio selection // H. Markowitz // Journal of Finance. – 1952. – Vol. 7(1)/ P. 77–91.
- [14] A framework of Web-based Decision Support Systems for portfolio selection with OLAP and PVM / J. Dong, H. S. Du, S. Wang, K. Chen, X. Deng // Decision Support Systems. – 2004. – No.37. – P. 367– 376.
- [15] Yahoo Finance - Stock Market Live, Quotes, Business & Finance News [Electronic resource]. – Access mode: <https://finance.yahoo.com/>.
- [16] Pandas-datareader [Electronic resource]. – Access mode: <https://pandasdatareader.readthedocs.io/en/latest/>.
- [17] 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

DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM FOR MANAGING PORTFOLIOS OF ENERGY SAVING PROJECTS AT ENERGY-INTENSIVE ENTERPRISES

DUBROVIN V.I.	Ph.D, Professor, Software Tools Department, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vdubrovin@gmail.com;
DEINEGA 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. Development of a software complex based on decision-making methods for managing a portfolio of energy-saving projects at energy-intensive enterprises.

Methodology. To solve the problem of managing project portfolios, Markowitz's portfolio theory of financial investments was chosen, which allows for the most profitable distribution of portfolio risk and performing income assessment using optimization methods. In combination with this theory, it was determined to use the methods of finding the maximum Sharpe ratio, as well as the minimum volatility based on a data package of randomly generated portfolios.

Findings. As a result of the work performed, a software system was developed, which has in its functionality the automatic download of a data package of selected shares for the specified period of time from the electronic resource, generates a random portfolio and performs its optimization by maximizing the Sharpe ratio and minimizing the volatility of the portfolio. Also, the program has the ability to display the results of optimization of the generated portfolio in the form of tables and graphs.

The decision support system for managing portfolios of energy-saving projects was considered through its generalization to methods of optimizing investment portfolios, but taking into account the specifics of the subject area.

The software complex was tested on a data set of share prices in energy-intensive enterprises. Graphical data and tables obtained as a result of system operation allow the program user to evaluate fully the created energy saving project portfolio.

Originality. The developed software system combines right away several methods, namely: methods of optimizing an investment portfolio according to Markowitz's portfolio theory, methods of finding the maximum Sharpe ratio and methods of finding minimum volatility. This solution allows you to use the system to solve a wide range of tasks.

Practical value. The completed development makes it possible to optimize conveniently the investment portfolios for various assets, which makes it possible to use the development of energy saving project portfolio management in energy-intensive enterprises. Also, the system can serve as a basis for such developments.

Keywords: decision support system; portfolio management; model Harry Markowitz; Sharpe coefficient; energy saving; energy-intensive enterprises.

REFERENCES

- [1] O. O. Veremeyenko (2018) Otsinka enerhoefektyvnosti pidpriemstv mashynobuduvannia ta rozroblennia proektiv z yii pidvyshchennia [Energy efficiency assessment of machine-building enterprises and development of projects to increase it]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Seriiia : Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove hospodarstvo*. 19(1), 43-46. (in Ukrainian.)
- [2] Weber, B. W. (2008). Financial DSS: Systems for supporting investment decisions. Handbook on Decision Support Systems 2. Springer Berlin Heidelberg, 419–442.
- [3] Kiyko, S. T. (2014) Systema pidtrymky pryiniattia rishen pry uprav-linni hroshovymy potokamy proektiv pidpriemstva [Decision-making support system for cash flow management of enterprise projects]. *Radioelektronni ta kompiuterni systemy*, 4 (68), 145-149. ISSN 1814-4225 (in Ukrainian.)
- [4] Kravchenko, T. K. (2014) Systemy pidtrymky pryiniattia rishen v otsyntsi efektyvnosti investytsiinykh proektiv u telekomu-nikatsiinii sferi [Decision support systems in evaluating the effectiveness of investment projects in the telecommunications sphere *Prykladna informatyka*, 5 (53), 119-132. ISSN 1993-8314 (in Ukrainian.)
- [5] Zhang, S. X., Babovic, V. (2011) An Evolutionary Real Options Framework for the Design and Management of Projects and Systems with Complex Real Options and Exercising Conditions. *Decision Support Systems*, 51, 1, 119–129.
- [6] Olteanu Alin Paul. (2011) A Decision Support System (DSS) for Project Management in the Biodiesel Industry. *Informatica Economica*, 15, 4, 189–202.
- [7] Barelli, L., Belloni, E., Bidini, G., Buratti, C., Pinchi E.M. (2021) Development of a Decisional Procedure Based on Fuzzy Logic for the Energy Retrofitting of Buildings. *Sustainability*, 13, 9318, 6-12.

- [8] Lin, C., Hsieh, P.-J. (2004). A fuzzy decision support system for strategic portfolio management. *In Decision Support Systems*, 38, 3, 383–398.
- [9] Dubrovin V.I., Deineha, L.Y., Laktionov V.V. (2022) Enerhozberezhennia na enerhoiemnykh pidpriemstvakh [Energy saving at energy-intensive enterprises]. *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka*, 2, 58-68. (in Ukrainian.)
- [10] Casanova, Isidoro J. (2012). Portfolio Investment Decision Support System Based on a Fuzzy Inference System. *Studies in Computational Intelligence*, 399, 184-187.
- [11] H. Zarei, M. H. Fazel Zarandi, & M. Karbasian. (2009). A New Fuzzy Dss/Es For Stock Portfolio Selection Using Technical And Fundamental Approaches In Parallel. Zenodo, pp. 1-4.
- [12] Breen, W. (1968) Specific versus General Models of Portfolio Selection. *Oxford Economic Papers*, November, 361- 368.
- [13] Markowitz, H. (1952) Portfolio selection. *Journal of Finance*, 7(1), 77–91.
- [14] Dong, J., Du, H. S., Wang, S., Chen, K., Deng, X. (2004) A framework of Web-based Decision Support Systems for portfolio selection with OLAP and PVM. *Decision Support Systems*, 37, 367–376.
- [15] Yahoo Finance - Stock Market Live, Quotes, Business & Finance News [Electronic resource]. - Access mode: <https://finance.yahoo.com/>.
- [16] Pandas-datareader [Electronic resource]. – Access mode: <https://pandasdatareader.readthedocs.io/en/latest/>.
- [17] 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_.