



Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№4'2021

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

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2021

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; **Міліх 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.

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

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 07.12.2021 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №3 від 06.12.2021 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 5, 12. Тираж 300 прим. Зам. №964.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№4'2021

Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2021

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

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 December 07, 2021 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No. 3 dated december 06, 2021). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 5,12. Number of copies printed 300. Rep. №964.

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

<i>Шевченко В.П., Бабійчук О.Б.</i> Магнітне поле трансформатора струму.....	8
<i>Ащеулов А.А., Дерев'янчук М.Я., Лавренюк Д.О.</i> Анізотропний метадіелектричний перетворювач.....	18

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

<i>Шевченко С.Ю., Данильченко Д.О., Білик С.Ю., Потривай А.Е., Ковтун Г.А.</i> Врахування впливу запиленості поверхні фотоелектричних модулів на генерацію електричної енергії сонячною станцією за допомогою MATLAB.....	28
--	----

III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Брилистий В.В., Назарова О.С., Осадчий В.В.</i> Вимірювання крутного моменту для дослідження енергетичних характеристик приводів електромобілей	36
---	----

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Shevchenko V.P., Babychuk O.B.</i> Magnetic field of current transformer.....	8
<i>Ashcheulov A.A., Derevianchuk M.Ya., Lavreniuk D.O.</i> Anisotropic metadielectric converter.....	18

II POWER ENGINEERING

<i>Shevchenko S.Y., Danylchenko D.O., Bilyk S.Y., Potryvai A.E., Kovtun G.A.</i> Considering the effect of dustiness of a photovoltaic module surfaces on solar power generation by matlab software.....	28
--	----

III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

<i>Brylysty V.V., Nazarova O.S., Osadchyy V.V.</i> Torque measurement for researching the energy characteristics of electric vehicle drives.....	36
---	----

СОДЕРЖАНИЕ

I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Шевченко В.П., Бабийчук О.Б.
Магнитное поле трансформатора тока.....8

Ащеулов А.А., Дервянчук Н.Я., Лавренюк Д.О.
Анизотропный метадиэлектрический преобразователь.....18

II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Шевченко С.Ю., Данильченко Д.А., Белик С.Ю., Потрываи А.Э., Ковтун Г.А.
Учет влияния запыленности поверхности фотоэлектрических модулей на генерацию электрической энергии солнечной станцией с помощью MATLAB.....28

III АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Брылистый В.В., Назарова Е.С., Осадчий В.В.
Измерение крутящего момента для исследования энергетических характеристик приводов электромобилей.....36

УДК 621.314

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

ШЕВЧЕНКО В.П. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Одесского национального университета, Одесса, Украина, E-mail: shevospu@gmail.com;

БАБИЙЧУК О.Б. научный сотрудник, научный сотрудник института компьютерных систем Одесского национального университета, Одесса, Украина, E-mail: obbabiychuk@ukr.net;

Цель работы. Разработка на основе детального анализа распределения магнитного поля в несимметричных конструкциях ТТ схемы замещения и составление математической модели расчета погрешностей применительно к многодиапазонному встроенному ТТ с тороидальной МС и одновитковой первичной обмоткой при различном заполнении МС витками вторичной обмотки.

Методы исследования. Экспериментальное исследование распределение магнитного поля в тороидальном трансформаторе тока и погрешностей трансформатора

Полученные результаты. Разработаны схемы замещения трансформатора тока, адекватно отражающие распределение магнитного поля в магнитопроводе трансформатора и математическая модель расчета погрешностей.

Научна новизна. По результатам моделирования в FEMM и экспериментальных исследований определен характер распределения магнитного поля при частичном заполнении магнитопровода витками вторичной обмотки, разработаны схемы замещения трансформатора тока.

Практическая ценность. Разработана математическая модель расчета распределения магнитного поля в магнитопроводе и погрешностей трансформатора, на основании которой составлена программа расчета погрешностей трансформаторов тока.

Ключевые слова: трансформатор тока; магнитное поле; векторная диаграмма; схема замещения; поток рассеяния; основной магнитный поток; свободная часть магнитопровода; критерий неравномерности распределения магнитного потока; токовая и угловая погрешности трансформатора.

I. ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные показатели трансформаторов тока определяются характером распределения магнитного поля, которое кроме основной составляющей (поля взаимоиндукции), содержит поля рассеяния обмоток. Баланс составляющих результирующего поля зависит от структуры магнитной системы, первичной и вторичной обмоток, величины нагрузки.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Распределение вторичных витков на магнитопроводе многодиапазонного ТТ (рис.1) определяет частичное заполнение магнитной системы (МС) на некоторых ступенях трансформации [12].

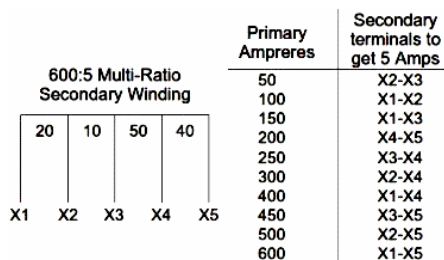


Рисунок 1. Распределение вторичных витков многодиапазонного ТТ

Данные экспериментального исследования [1, 2] распределения индукции в стали (B_c) по длине (L_M) магнитной системы (МС) как при различной величине вторичной нагрузки и постоянном секторе (α_2) вторичной обмотки (рис.2), так и при разных секторах распределения вторичной обмотки на МС и постоянной нагрузке (рис. 3) показывают неравномерное распределения индукции в стали МС.

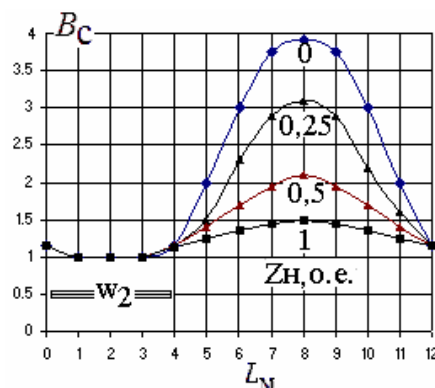


Рисунок 2. $B_c = \varphi(L_M, Z_H), \alpha_2 = const$

Поскольку влияние поля рассеяния ТТ на основное поле в МС наиболее характерно проявляется при короткозамкнутой вторичной обмотке (рис.2), этот режим принят основным при анализе

распределения индукции ($B_c = (L_M)$) магнитного поля в стали магнитопровода.

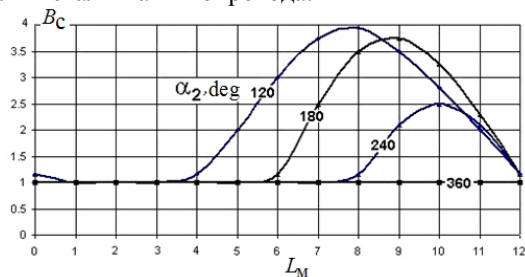


Рисунок 3. $B_c = \varphi(L_M, \alpha_2), Z_H = 0$

Неравномерное распределение магнитного поля по длине магнитопровода для ТТ различного конструктивного исполнения подтверждают результаты моделирования в FEMM [1, 2]. Симметричная конструкция трансформатора (при полном заполнении МС витками вторичной обмотки – $\alpha_2 = 360 \text{град}$) является частным случаем несимметричной (при неполном заполнении МС витками вторичной обмотки – $\alpha_2 < 360 \text{град}$) и для нее справедливы схемы замещения, векторные диаграммы и математические модели несимметричного трансформатора. Поэтому для обобщения результатов анализа целесообразно рассмотреть электромагнитный процесс в несимметричной структуре трансформатора.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка на основе детального анализа распределения магнитного поля в несимметричных конструкциях ТТ схемы замещения и составление математической модели расчета погрешностей применительно к многодиапазонному встроенному ТТ с тороидальной МС и одновитковой первичной обмоткой при различном заполнении МС витками вторичной обмотки.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исходя из расчета распределения магнитного поля ТТ по FEMM [1, 2] на рис. 4 показан эскиз магнитной системы трансформатора несимметричной конструкции, состоящей из тороидального витого магнитопровода, первичной обмотки с числом витков $W_1 = 1$, которая проходит по центру тора, и вторичной обмотки с числом витков W_2 , которая занимает на МС произвольный сектор α_2 . Части полных потоков первичной Φ_1 , и вторичной Φ_2 обмоток, которые не берут участия в образовании потока взаимной индукции, образуют поток рассеяния Φ_σ .

Условно каждый из них можно изобразить в виде двух составляющих (рис. 4) – потока, который замыкается только в воздухе $\Phi_{\sigma B}$, и потока,

который замыкается как по МС, так и через воздух $\Phi_{\sigma C}$

$$\Phi_\sigma = \Phi_B + \Phi_C \quad \Phi_\sigma = \Phi_{\sigma B} + \Phi_{\sigma C} \quad (1)$$

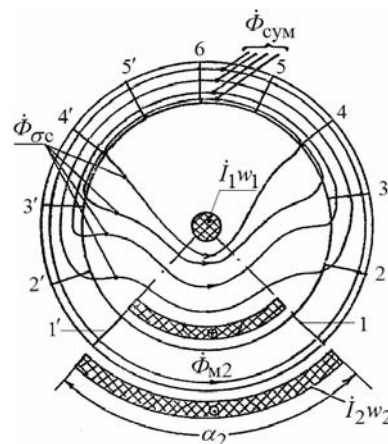


Рисунок 4. Распределение магнитных потоков

Анализ изменения тангенциальной составляющей магнитной индукции (B_τ) поля рассеяния (рис. 5) по длине канала рассеяния между первичной и вторичной обмотками показывает, что на участке магнитной цепи 4–5–6–5'–4' (рис. 4), магнитное поле в пространстве внутри тороидальной МС настолько мало, что им можно пренебречь и не учитывать составляющую поля рассеяния, которая замыкается через воздух ($\Phi_{\sigma B} = 0$).

Считая, что весь поток рассеяния (Φ_σ) замыкается по стали магнитной системы, можно принять

$$\Phi_\sigma = \Phi_{\sigma C} = \Phi_{\sigma 1C} + \Phi_{\sigma 2C} \quad (2)$$

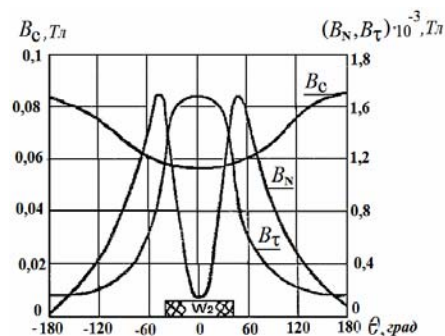


Рисунок 5. Распределение составляющих магнитного поля ТТ

Тангенциальная составляющая магнитной индукции B_τ (поле рассеяния в зазоре между первичной и вторичной обмотками) при $\theta = 0$ (рис. 5), что соответствует середине вторичной обмотки, и нормальная составляющая магнитной индукции поля рассеяния B_N (рис. 5), что входит в МС на участках 2–4, 2'–4' (рис. 4), практически равны.

Если рассматривать изменение магнитного потока в МС на участке от середины вторичной обмотки к середине свободного участка МС (рис. 5), то

оказывается, что действие потоков рассеяния первичной ($\Phi_{\sigma 1C}$) и вторичной ($\Phi_{\sigma 2C}$) обмоток относительно потока взаимной индукции одинаково.

Результирующая индукция поля рассеяния в любой точке пространства внутри магнитопровода $B_{\sigma} = \sqrt{B_N^2 + B_r^2}$. В результате взаимодействия потоков первичной (Φ_1) и вторичной (Φ_2) обмоток в МС устанавливается результирующий магнитный поток Φ_0 (рис. 6).

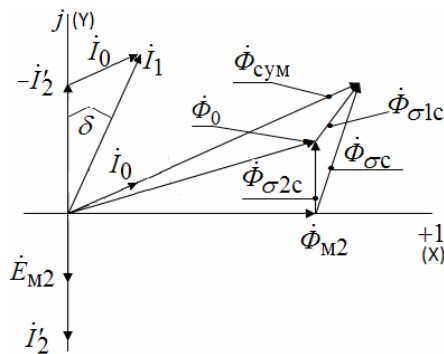


Рисунок 6. Диаграмма векторов ТТ

Под действием потока рассеяния $\Phi_{\sigma 2C}$ магнитный поток в МС увеличивается (рис. 6) от значения потока взаимной индукции Φ_{M2} (на участке магнитной цепи под вторичной обмоткой) до значения результирующего потока Φ_0 на участке $2(2')$ магнитопровода (рис. 4).

Поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1C}$ увеличивает поток в стали от значения Φ_0 до значения полного потока $\Phi_{\text{сум}}$ (участок 6 на рис. 4). При этом, не увеличивая полезного магнитного потока (потока взаимной индукции), действие потоков $\Phi_{\sigma 1C}$ и $\Phi_{\sigma 2C}$ приводит к неравномерности распределения магнитного потока вдоль МС ($B_C = \varphi(\theta)$ на рис. 5), и как следствие, к увеличению его магнитного сопротивления и результирующей МДС намагничивания.

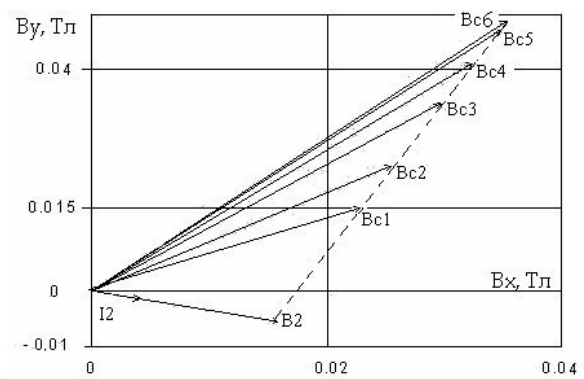
Величина магнитного потока в МС определяется ЭДС, которая должна быть наведена во вторичной обмотке ТТ

$$E_{M2} = I_2 \cdot \sqrt{(R_H + r_2)^2 + X_H^2}, \quad (3)$$

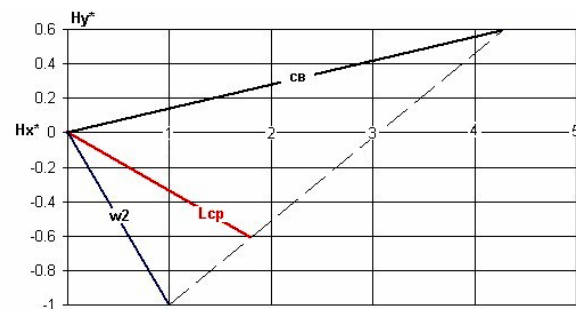
где полное сопротивление вторичной цепи включает активное сопротивление вторичной обмотки (r_2) и параметры нагрузки (R_H, X_H).

Поскольку величина ЭДС вторичной обмотки определяется магнитным состоянием только участка МС под вторичной обмоткой, а распределение магнитного потока по длине части МС, свободной от вторичной обмотки, неравномерно и зависит от потоков рассеяния ТТ, то ЭДС, обусловленная потоком рассеяния, может быть определена путем учета действительного характера распределения индукции результирующего магнитного поля в МС

$$B_C = \varphi(L_M)$$



а



б

Рисунок 7. Диаграмма векторов ТТ[^]

а – эксперимент; б – расчет по FEMM (в относительных единицах)

Экспериментальная диаграмма распределения векторов индукции магнитного поля на участках 1–6 (рис. 4) при $\alpha_2 - 90^\circ$ приведена на рис. 7,а. Соотношение векторов напряженности магнитного поля в участках магнитной цепи под вторичной обмоткой (w_2), вдоль средней длины МС (L_{cp}) и на свободной от витков вторичной обмотки части МС (СВ) при $\alpha_2 - 90^\circ$, полученные при моделировании в FEMM [2] представлены на рис. 7,б.

Характер действия потоков рассеяния ($\Phi_{\sigma 1C}$, $\Phi_{\sigma 2C}$) позволяет представить картину распределения магнитного поля в ТТ так, как это показано на рис. 4.

Из этой модели следует, что с помощью Т-образной схемы замещения не всегда удается точно отобразить действительное распределение магнитного поля в ТТ с несимметрией магнитной или электрической цепей.

Схема замещения трансформатора

Полезный поток ТТ изменяется в широком диапазоне и зависит от величины нагрузки и режима работы. Для Т-образной схемы замещения не удается найти наглядную и достаточно точную зависимость параметров схемы (x_1, x_2) замещения (рис. 8) от элементов конструкции трансформатора, потоков всех обмоток. Т-образная схема замещения (рис.8) достаточно полно отображает электромаг-

нитные процессы только в ТТ симметричной конструкции.

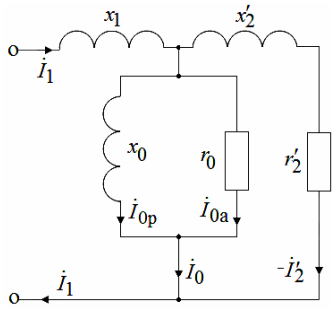


Рисунок 8. Т-образная схема замещения для режима $Z_H = 0$

В случае, когда вторичная обмотка ТТ занимает на МС сектор α_2 , можно предположить [4], что магнитопровод состоит из двух участков (рис. 4). На участке МС под вторичной обмоткой (1–1' на рис. 4) длиной l_2 при $Z_H = 0$ действует поток $\Phi_{M2} \equiv I_2 \cdot r_2$, которому соответствует магнитная индукция

$$B_{M2} = \frac{E_{M2}}{4k_f \cdot w_2 \cdot S_M} \quad (3)$$

и магнитное сопротивление

$$Z_{\mu 2} = \frac{l_2}{S_2 \cdot \mu_2} = \frac{l_2}{S_2 \cdot (\dot{B}_{M2} / \dot{H}_2)} \quad (4)$$

На участке МС, свободном от витков вторичной обмотки длиной $l_{CB} = l_M - l_2$ (1–6–1 на рис. 4), магнитная индукция обусловлена суммарным действием магнитных потоков Φ_{M2} и $\Phi_{\sigma c}$. Магнитное сопротивление этого участка

$$Z_{\mu CB} = \frac{l_{CB}}{S_{CB} \cdot \mu_{CB}} = \frac{l_{CB}}{S_{CB} \cdot (\dot{B}_{CB} / \dot{H}_{CB})} \quad (5)$$

При этом предполагается, что значение магнитной индукции в произвольном сечении вдоль соответствующего участка МС, т.е. $B_{M2}(l_2) = const$ и $B_{CB}(l_{CB}) = const$, а также значение магнитной индукции в поперечном сечении МС не изменяются. Схема замещения, соответствующая такому представлению электромагнитного процесса, приведена на рис.9 для режима короткозамкнутой вторичной обмотки $Z_H = 0$, при котором величина ЭДС вторичной обмотки определяется падением напряжения на ее активном сопротивлении (r'_2).

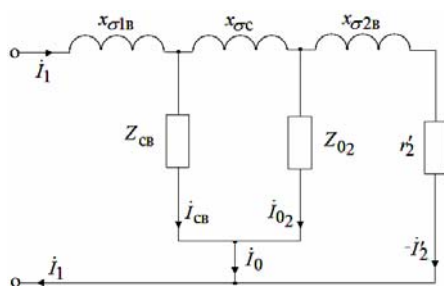


Рисунок 9. Схема замещения ТТ для режима $Z_H = 0$

Так как при неизменном значении величины сектора α_2 проводимость канала рассеяния между первичной и вторичной обмотками постоянная, а степень насыщения участков магнитной цепи определяется величинами потоков Φ_{M2} и Φ_{CB} , то можно считать постоянным и не зависимым от режима работы параметр схемы замещения $X_{\sigma c}$, а магнитные сопротивления ветвей намагничивания Z_{02} и Z_{CB} – зависимыми только от потоков Φ_{M2} и Φ_{CB} .

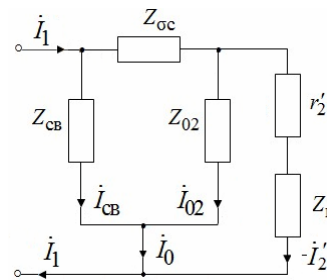


Рисунок 10. Упрощенная схема замещения

Для ТТ с небольшим количеством слоев вторичной обмотки ($n_{cl} \leq 4$) можно пренебречь магнитным потоком рассеяния, который замыкается только по воздуху ($\Phi_{\sigma B}$) и в дальнейшем можно перейти к рассмотрению упрощенной схемы замещения ТТ (рис. 10).

При значительной неравномерности распределения потока по длине МС, что имеет место в ТТ с небольшими секторами вторичной обмотки ($\alpha_2 < \pi$) и в других случаях значительной несимметрии магнитной системы, необходимо использовать разветвленную схему замещения (рис. 11). Эта схема учитывает магнитное состояние каждого из выделенных (рис. 4) участков незаполненной части МС.

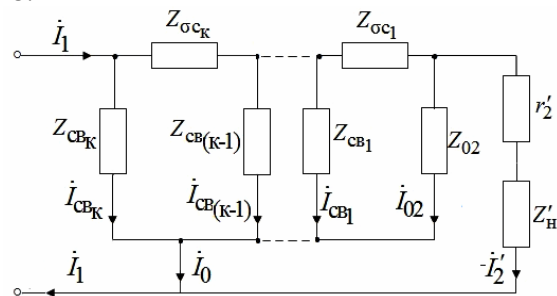


Рисунок 11. Полная схема замещения ТТ

Параметры полного потока рассеяния

Для потока рассеяния ТТ примем векторную разность между значением полного магнитного потока в МС на середине участка, свободного от витков вторичной обмотки ($\Phi_{\text{сум}}$) и результирующе-

щим магнитным потоком на участке МС под вторичной обмоткой (Φ_{M2}).

Амплитудное значение магнитного потока рассеяния при условии равенства токов первичной и вторичной обмоток

$$\Phi_{\sigma c} = \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \Lambda_{\sigma} \cdot I_1 \cdot w_1, \quad (6)$$

где Λ_{σ} – проводимость пути полного потока рассеяния, Гн.

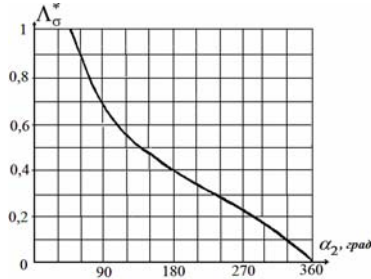


Рисунок 12. Зависимость $\Lambda_{\sigma}^* = \varphi(\alpha_2)$

Если обозначить через $\Lambda_{\sigma \max}$ проводимость Λ_{σ} , для некоторого минимального угла ($\alpha_{2 \min} = 45^\circ$), то можно построить зависимость $\Lambda_{\sigma}^* = \Lambda_{\sigma} / \Lambda_{\sigma \max} = \varphi(\alpha_2)$ (рис. 12), которая представляет собой удельную проводимость пути магнитного потока рассеяния ТТ единичной высоты [4].

Для ТТ с высотой МС dh проводимость пути потока рассеяния

$$d\Lambda_{\sigma} = \Lambda_{\sigma}^* \cdot dh = \Lambda_{\sigma}^* \cdot R_0 \cdot d\alpha, \quad (7)$$

где $R_0 = 0,5 [R_M + 0,5(D_{BH} + T_M - D_{Ш})]$;

D_{BH} , $D_{Ш}$ – внутренний диаметр магнитопровода,

диаметр первичной обмотки; $R_M = 0,707T_M$ – радиус окружности, описанной вокруг МС квадратного сечения размером T_M .

Полную проводимость пути потока рассеяния ТТ в МС квадратного сечения можно получить, интегрируя (7) в пределах от $\alpha = 0$ до $\alpha = 2\pi$

$$\Lambda_{\sigma \text{ кв}} = \int_0^{2\pi} d\Lambda_{\sigma} = \int_0^{2\pi} \Lambda_{\sigma}^* \cdot R_0 \cdot d\alpha = 2\pi \cdot \Lambda_{\sigma}^* \cdot R_0 \quad (8)$$

При отличии формы сечения магнитной системы ТТ от квадратной необходимо учесть проводимость области размером $(H_M - T_M)$

$$\Delta\Lambda_{\sigma} = 2\Lambda_{\sigma}^* \cdot (H_M - T_M). \quad (9)$$

С учетом (8, 9) проводимость пути потока рассеяния ТТ с МС прямоугольного сечения

$$\Lambda_{\sigma} = \Lambda_{\sigma \text{ кв}} + \Delta\Lambda_{\sigma} = \Lambda_{\sigma}^* \cdot (\pi \cdot 0,5(D_{BH} + T_M - D_{Ш}) + 2H_M) \quad (10)$$

Распределение индукции по длине магнитопровода

Плотность потока рассеяния в магнитопроводе ТТ

$$B_{\sigma} = 4\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \frac{\Lambda_{\sigma} \cdot I_{1H} \cdot w_1 \cdot k_{i1} \cdot (w_2 - w_{11})}{S_M \cdot w_2} 10^{-7}. \quad (11)$$

Уравнение (11) справедливо для произвольного распределения вторичной обмотки на магнитопроводе и при его использовании необходимо учитывать следующее:

- если вторичная обмотка занимает меньше одного слоя, то $w_{11} = 0$, а величина сектора заполнения МС вторичной обмоткой с учетом клина $\alpha_2 < 2\pi$;
- при целом числе слоев обмотки $w_{11} = w_2$, $\alpha_2 = 2\pi$;
- в самом общем случае, когда обмотка занимает более одного слоя, то w_{11} представляет собой сумму витков во всех полных слоях вторичной обмотки, а α_2 – величина сектора магнитопровода, заполненного $(w_2 - w_{11})$ витками вторичной обмотки в последнем слое, $\alpha_2 < 2\pi$.

Полный магнитный поток ($\Phi_{\text{сум}}$) в магнитопроводе ТТ (рис. 6) определяется наложением магнитного потока взаимной индукции Φ_{M2} и полного магнитного потока рассеяния Φ_{σ} .

В расчетной модели ТТ на свободной части магнитопровода выделяется нечетное количество радиальных плоскостей $k = q$ (рис. 13, рис. 14). При этом рассматривается четное число участков $i = q - 1$, между радиальными сечениями $1, \dots, q$ ($q = 11, i = 10$ на рис. 13).

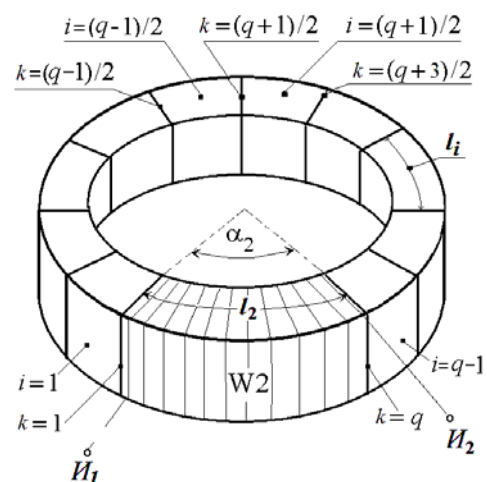


Рисунок 13. Расчетная модель ТТ

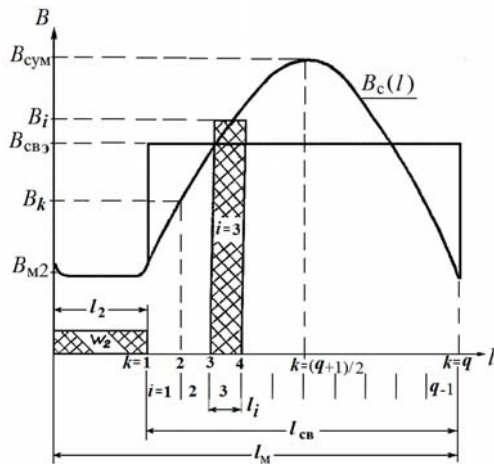


Рисунок 14. К расчету МДС намагничивания

С достаточной для практики точностью распределение магнитной индукции поля рассеяния в произвольном сечении (k) свободного от вторичной обмотки участка МС может быть принято синусоидальным (рис. 14) с максимумом в середине участка МС, свободного от витков вторичной обмотки при $k = (q+1)/2$

$$B_{\sigma k} = B_{\sigma} \cdot \sin\left(\pi \frac{k}{q+1}\right). \quad (12)$$

Значение магнитной индукции (B_k) в произвольном сечении свободного от вторичной обмотки участка МС

$$B_k = \sqrt{B_{\sigma k}^2 + B_{M2}^2}, \quad (13)$$

На участке МС под вторичной обмоткой магнитная индукция принимается неизменной по длине участка и определяется (3) величиной магнитного потока взаимоиндукции Φ_{M2} .

Поскольку на участке МС, свободном от витков вторичной обмотки зависимость $B_c(l)$ симметрична (рис. 14) относительно среднего сечения МС ($k = (q+1)/2$), расчеты можно выполнять для половины этой части МС трансформатора.

Расчет МДС, тока намагничивания

Критерий неравномерности распределения магнитной индукции по длине МС можно представить в виде

$$\xi = (B_{\text{сум}}/B_{M2}) - 1. \quad (14)$$

В зависимости от величины критерия целесообразно использовать разные способы расчета тока намагничивания ТТ.

При значительной неравномерности зависимости $B_c(l_M)$, т.е. при $\xi > 0,25$, свободная часть МС представляется состоящей из $i = q-1$ элементов, а ток намагничивания определяется исходя из закона полного тока –

$$I_0 = \frac{1}{w_1} \int_l H \cdot dl = \frac{1}{w_1} \sum_{j=1}^i H_j \cdot dl_j. \quad (15)$$

При расчетах принимается постоянным значение магнитной индукции в любом сечении по длине i -го элемента МС (l_i) ($i = 3$ на рис. 14), а значения индукций:

$$B_i = 0,5(B_{k(k=i)} + B_{k(k=i+1)}). \quad (16)$$

$$B_{\sigma i} = 0,5(B_{\sigma k(k=i)} + B_{\sigma k(k=i+1)}). \quad (17)$$

Составляющие напряженности магнитного поля в сечении i -го элемента свободной части МС для принятой системы координат (рис. 6)

$$H_{ix} = H_i \cdot \cos(\varphi_2 + \theta_i + \psi_i), \quad (18)$$

$$H_{iy} = H_i \cdot \sin(\varphi_2 + \theta_i + \psi_i). \quad (19)$$

Угол сдвига вектора ЭДС E_{M2} относительно вектора вторичного тока I_2 (рис. 15) определяется характером вторичной нагрузки

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_H}{R_H + r_2}. \quad (20)$$

Сдвиг вектора индукции i -го элемента (B_{CBi}) свободной части МС относительно индукции в части МС под вторичной обмоткой (B_{M2})

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{B_{M2}^2 + B_i^2 - B_{\sigma i}^2}{2B_{M2} \cdot B_i}\right). \quad (21)$$

Аналогично определяются составляющие напряженности магнитного поля в МС под вторичной обмоткой

$$H_{M2x} = H_{M2} \cdot \cos(\varphi_2 + \psi_2), \quad (22)$$

$$H_{M2y} = H_{M2} \cdot \sin(\varphi_2 + \psi_2). \quad (23)$$

Результирующая МДС (F_0) определяется суммированием составляющих МДС по осям координат.

$$F_x = 2 \cdot l_i \cdot \sum_{i=1}^{(q-1)/2} H_{ix} + H_{M2x} \cdot l_2, \quad (24)$$

$$F_y = 2 \cdot l_i \cdot \sum_{i=1}^{(q-1)/2} H_{iy} + H_{M2y} \cdot l_2, \quad (25)$$

где l_2 – длина части МС под вторичной обмоткой;

l_i – длина участка свободной части МС,

Результирующая МДС

$$F_0 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}. \quad (26)$$

Угол сдвига вектора результирующей МДС относительно оси X

$$\beta = \arctg(F_y/F_x). \quad (27)$$

Ток намагничивания

$$I_0 = F_0 / w_1. \quad (28)$$

При незначительной ($\xi \leq 0,25$) неравномерности распределения $B_c(l_M)$ определяется эквивалентное значение (рис. 14) магнитной индукции $B_{CBЭ}$, при условии равномерного распределения магнитного потока вдоль свободной части МС.

$$B_{CBЭ} = \frac{1}{15} \left[\begin{array}{l} B_{k(1)} + 2(B_{k(3)} + B_{k(5)} + B_{k(6)}) + \\ + 4(B_{k(2)} + B_{k(4)}) \end{array} \right] \quad (29),$$

где $B_k \dots B_{k(6)}$ – значение магнитной индукции в сечениях $k = 1 \dots 6$ свободной части МС (рис. 13).

Угол сдвига вектора индукции ($B_{CBЭ}$) свободной части МС относительно индукции в части МС под вторичной обмоткой (B_{M2})

$$\theta_3 = \arccos(B_{M2} / B_{CBЭ}). \quad (30)$$

МС представляется состоящей из двух частей (рис. 14): части под вторичной обмоткой длиной l_2 с величиной индукции в стали B_{M2} и части МС длиной $l_{CB} = l_M - l_2$ с магнитной индукцией в стали $B_{CBЭ}$.

Составляющие МДС по осям координат

$$F_{эx} = H_{CBЭ} \cdot l_{CB} \cdot \cos(\varphi_2 + \theta_3 + \psi_{CB}) + H_{M2x} \cdot l_2; \quad (31)$$

$$F_{эy} = H_{CBЭ} \cdot l_{CB} \cdot \sin(\varphi_2 + \theta_3 + \psi_{CB}) + H_{M2y} \cdot l_2, \quad (32)$$

Результирующая МДС, угол сдвига β вектора результирующей МДС относительно оси X и ток намагничивания рассчитываются по (26, 27, 28).

Токковая и угловая погрешности ТТ

$$f = \frac{I_0}{I_{1H} \cdot k_{f1}} \cdot \sin(\beta) \cdot 100, \quad (35)$$

$$\delta = \frac{I_0}{I_{1H} \cdot k_{f1}} \cdot \cos(\beta) \cdot 3440. \quad (36)$$

Представленная математическая модель реализована в подсистеме проектирования и анализа ТТ [4].

Апробация математической модели

Экспериментальные и расчетные по [4] исследования распределения индукции в радиальных сечениях по длине МС при короткозамкнутой вторичной обмотке ($Z_H = 0$) проводились на образце ТТ с размерами МС 345/215/80 мм при токе $I_1 = 150A$, числе витков обмотки $w_2 = 150$ и секторах заполнения $\alpha_2 = 2\pi/3$ (рис. 15, а), $\alpha_2 = 2\pi$ (рис. 15, б), $\alpha_2 = (2 + 2/3)\pi$ (рис. 15, в), $\alpha_2 = (2 + 4/3)\pi$ (рис. 15, г).

Исследования погрешностей многодиапазонного ТТ выполнялись на ТТ размерами МС

$D_H / D_{BH} / H = 345 / 215 / 80$ мм с числом витков $w_2 = 40, 60, 80, 120$, занимающих на МС сектора $\alpha_2 = 120, 180, 240, 360$ град соответственно. Данные экспериментальных (э) и расчетных (р) исследований токовой и угловой погрешностей сведены в табл. 1, 2.

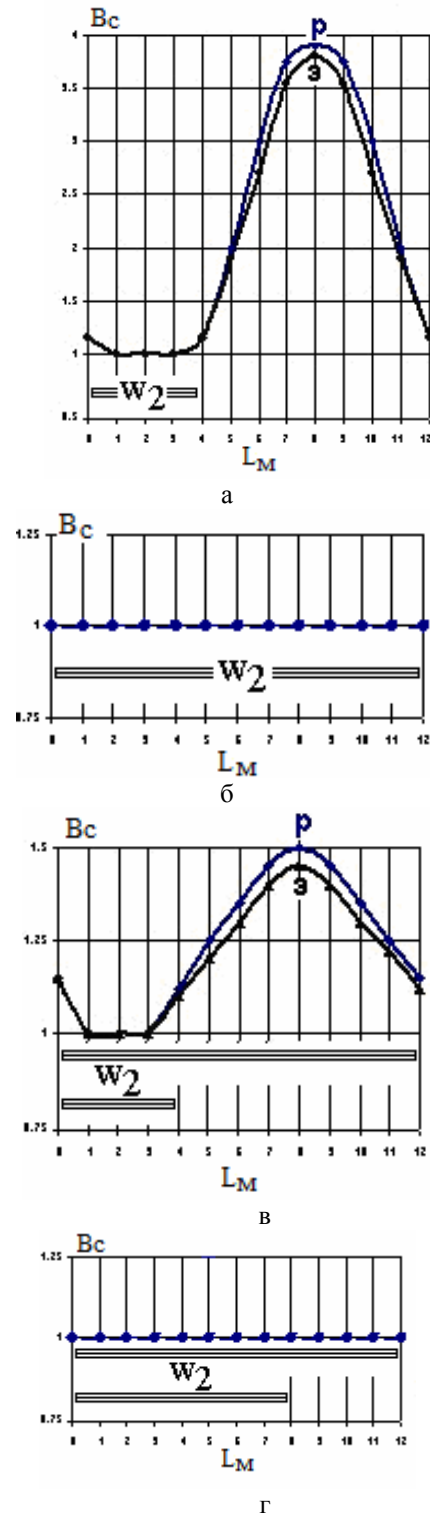


Рисунок 15. Зависимость $B = \varphi(l_M, \alpha_2)$ при различном заполнении магнитопровода

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Таблица 1. Токовая погрешность

I_1, A	$Z_H, Ом$		$f, \%$			
			$0,5I_{1H}$	I_{1H}	$1,2I_{1H}$	$Z = 0,5Z_H$
200	0,6	э	2,1	1,8	1,7	1,2
		р	2,21	1,7	1,56	1,21
300	0,6	э	1,2	0,95	0,92	0,6
		р	1,2	0,9	0,85	0,59
400	0,8	э	0,8	0,66	0,64	0,43
		р	0,9	0,67	0,62	0,43
600	1,2	э	0,48	0,41	0,38	0,25
		р	0,58	0,44	0,42	0,27

Таблица 2. Угловая погрешность

I_1, A	$Z_H, Ом$		$\delta, мин$			
			$0,5I_{1H}$	I_{1H}	$1,2I_{1H}$	$Z = 0,5Z_H$
200	0,6	э	28	15	14	13
		р	32	20	17	16
300	0,6	э	15	9	7	6
		р	18	13	10	8
400	0,8	э	12	7	6	4
		р	15	10	9	7
600	1,2	э	10	6,5	5,5	5
		р	11	8	6	6

V. ВЫВОДЫ

1. Распределение магнитного поля в магнитопроводе ТТ неравномерно и определяются сектором заполнения магнитопровода витками вторичной обмотки и величиной нагрузки.

2. Т-образная схема замещения ТТ справедлива только для трансформаторов с полным заполнением МС витками вторичной обмотки.

3. П-образная схема замещения ТТ учитывает влияние полей рассеяния обмоток на величину индукции в радиальных сечениях МС.

4. Для практических расчетов количество участков свободной части магнитопровода необходимо принимать не менее десяти.

5. При многослойной вторичной обмотке необходимо учитывать сектор распределения витков последнего слоя.

6. Математическая модель расчета погрешностей дает удовлетворительные результаты расчета распределения индукции в МС и погрешностей ТТ при произвольном расположении вторичной обмотки на магнитопроводе трансформатора.

[1] Шевченко В.П., Бабийчук О.Б. Исследование магнитного поля трансформатора тока. Электромашиностроение и электрооборудование, №70, 2008, с. 91–94.

[2] Shevchenko, V. P., Babiychuk, O. B., Boltenev, V. A., Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex. Applied Aspects of Information Technology, 2019; Vol.2 No.4: 317–327

[3] Костадин Брандиски, Илона Ячева САД системи в електромагнетизма. Руководство за QuickField и FEMM. – SIELA, 2002, – 243 с.

[4] Шевченко В.П. Пакет программ проектирования и анализа трансформаторов тока. – www.twirpx.com, 2017, – 155 МБ.

[5] Shevchenko V. Heightened the precision of current transformers. – Proceedings of XIV-th International Symposium SIELA 2005, Bulgaria. Vol. I, p. 123–127.

[6] Кузнецов С.Л., Дегтярев А.А. Математическое моделирование трансформаторов тока с глубоким насыщением магнитопроводов. – Sigre, 2015. – 8 с.

[7] Приступ А.Г. Моделирование магнитных полей в программе FEMM: учеб.–метод. пособие/ А.Г. Приступ, А.В. Червяков. –Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 92 с.

[8] Систематические погрешности измерительных трансформаторов тока: Зависимость от величины первичного тока/А.Е. Усачев, Ф.Ф. Муллин. Проблемы энергетики, 2004, 7-8, с. 35–40.

[9] Nicola Branchi Electrical machine analysis using finite elements. –Taylor & Francis Group, 2005, – 275 p.

[10] Colonel Wm. T. McLyman Transformers and Inductor Design Handbook. Forth Edition.–Taylor and Francis Group, 2011, – 669 p.

[11] Jay Andersen Current Transformers Theory & Testing. Omicron Academy, 2016, – 54 p.

[12] Steve Laslo Current Transformers. Bonneville Power Administration. Revision 1.2, 2013, – 142 p.

[13] Edvard Csanyi The Essentials Of Current Transformers In Power Circuits (Theory and Practice), Electrical Engineering Portal, December, 3rd 2018.

[14] Heathcote Martin J. J & P Transformer Book 13th Edition. – Elsevier Ltd., 2007. XIV, 974 p.

[15] Werner D.H., Kwon D.-H. (eds.) Transformation Electromagnetics and Metamaterials: Fundamental Principles and Applications. – Springer, 2014. –

499 p.

[16] Hurley W.G., Wölfle W.H. Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications. – John Wiley & Sons Ltd., 2013. – 360 p.

[17] Poularikas A.D. The Transforms and Applications Handbook. –IEEE Press, 2010, –914 p.

Стаття надійшла до редакції 20.11.21

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

ШЕВЧЕНКО В.П. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Одеського національного університета, Одеса, Україна, E-mail: shevospu@gmail.com

БАБІЙЧУК О.Б. научный сотрудник, научный сотрудник института компьютерных систем Одеського національного університета, Одеса, Україна, E-mail: obbabiychuk@ukr.net

Мета роботи. Розробка на основі детального аналізу розподілу магнітного поля в несиметричних конструкціях ТТ схеми заміщення і складання математичної моделі розрахунку похибок стосовно багатодіапазонного вбудованого ТТ з тороїдальною МС і одновитковою первинною обмоткою при різному заповненні МС витками вторинної обмотки.

Методи дослідження. Експериментальне дослідження розподіл магнітного поля в тороїдальному трансформаторі струму та похибок трансформатора

Отримані результати. Розроблено схеми заміщення трансформатора струму, адекватно відображають розподіл магнітного поля в магнітопроводі трансформатора і математична модель розрахунку похибок.

Наукова новизна. За результатами моделювання у FEMM та експериментальних досліджень визначено характер розподілу магнітного поля при частковому заповненні магнітопроводу витками вторинної обмотки, розроблено схеми заміщення трансформатора струму.

Практична цінність. Розроблено математичну модель розрахунку розподілу магнітного поля в магнітопроводі та похибок трансформатора, на підставі якої складено програму розрахунку похибок трансформаторів струму.

Ключові слова: трансформатор струму; магнітне поле; векторну діаграму; схема заміщення; потік розсіювання; основний магнітний потік; вільна частина магнітопроводу; критерій нерівномірності розподілу магнітного потоку; струмова та кутова похибки трансформатора.

MAGNETIC FIELD OF CURRENT TRANSFORMER

SHEVCHENKO V.P. Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Machines Department, Odessa National University, Odessa, Ukraine, E-mail: shevospu@gmail.com

BABIYCHUK O.B. Researcher, Researcher, Institute of Computer Systems, Odessa National University, Odessa, Ukraine, E-mail: obbabiychuk@ukr.net

Purpose. Development of equivalent circuits based on a detailed analysis of the magnetic field distribution in asymmetric CT structures and drawing up a mathematical model for calculating errors in relation to a multi-range built-in CT with a toroidal MC and a single-turn primary winding with different filling of the MC with turns of the secondary winding.

Methodology. Experimental study of the magnetic field distribution in a toroidal current transformer and transformer errors

Findings. The equivalent circuits of the current transformer, which adequately reflect the distribution of the magnetic field in the magnetic circuit of the transformer and a mathematical model for calculating the errors, were developed.

Originality. Based on the results of modeling in FEMM and experimental studies, the nature of the distribution of the magnetic field with partial filling of the magnetic circuit with turns of the secondary winding was determined, and equivalent circuits of the current transformer were developed.

Practical value. A mathematical model was developed for calculating the distribution of the magnetic field in the magnetic circuit and the transformer errors, on the basis of which a program for calculating the errors of current transformers was compiled.

Key words: current transformer; a magnetic field; vector diagram; equivalent circuit; leakage flux; main magnetic flux; free part of the magnetic circuit; criterion of non-uniformity of magnetic flux distribution; current and angular errors of the transformer.

REFERENCES

- [1] Shevchenko, V.P., Babiychuk O.B. (2008). Iedovanie magnitnogo polya transformatora toka. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie*, No 70, 91-94.
- [2] Shevchenko, V.P., Babiychuk, O.B. (2008). Issledovanie magnitnogo polya transformatora toka. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie*. No 70, 91-4.
- [3] Brandiski, K., Yacheva, I. (2002) CAD sistemi v elektromagnetizma. Rukovodstvo za QuickField i FEMM. SIELA, 243.
- [4] Shevchenko, V.P. (2017) Paket programm proektirovaniya i analiza transformatorov toka. 155.
- [5] Shevchenko, V. (2005). Heightened the precision of current transformers. Proceedings of XIV-th International Symposium SIELA, Bulgaria. Vol. 1, 123-127.
- [6] Kuzhekov, S.L., Degtyarev, A.A. (2015) Matematicheskoe modelirovanie transformatorov toka v rezhimakh s glubokim nasyischeniem magnitoprovodov Sigre, 8.
- [7] Pristup, A.G., Chervyakov, A.V. (2012) Modelirovanie magnitnykh poley v programme FEMM: ucheb.-metod. Posobie. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 92.
- [8] Usachev, A.E., Mullin, F.F. (2004) Sistematische-kie pogreshnosti izmeritelnykh transformatorov toka: Zavisimost ot velichiny pervichnogo toka. *Problemy energetiki*, 7-8, 35-40.
- [9] Branchi, N. (2005) Electrical machine analysis using finite elements. Taylor & Francis Group, 275.
- [10] Colonel Wm. T. McLyman (2011) Transformers and Inductor Design Handbook. Forth Edition. Taylor and Francis Group, 669.
- [11] Jay Andersen Current Transformers Theory & Testing. Omicron Academy, 2016, 54.
- [12] Steve Laslo Current Transformers. (2013) Bonneville Power Administration. Revision 1.2, 142.
- [13] Edvard Csanyi The Essentials Of Current Transformers In Power Circuits (Theory and Practice), Electrical Engineering Portal, December, 3rd 2018.
- [14] Heathcote Martin J. J & P Transformer Book 13th Edition. Elsevier Ltd., 2007. XIV, 974.
- [15] Werner D.H., Kwon D.-H. (eds.) (2014) Transformation Electromagnetics and Metamaterials: Fundamental Principles and Applications. Springer, 499.
- [16] Hurley, W.G., Wölfle, W.H. (2013) Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications. John Wiley & Sons Ltd., 360.
- [17] Poularikas, A.D. (2010) The Transforms and Applications Handbook. IEEE Press, 914.

УДК 537.31

Анізотропний метадіелектричний перетворювач

АЩЕУЛОВ А.А. д-р техн. наук, професор, Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Чернівці, Україна, e-mail: ashcheulovaa@rambler.ru;
ДЕРЕВ'ЯНЧУК М.Я. аспірант, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна, e-mail: m.derevianchuk@ukr.net;
ЛАВРЕНЮК Д.О. інженер, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна, e-mail: lavreniuk.dmytro.clg@chnu.edu.ua

Мета роботи. Дослідження особливостей перетворення енергії електричного поля анізотропним метасередовищем при від'ємному значенні діелектричної проникності в одному з обраних головних кристалографічних напрямків.

Методи дослідження. Проведено дослідження із застосуванням методів фізико-математичного моделювання анізотропного метадіелектричного перетворювача; з використанням методів оптимізації функції залежності коефіцієнта перетворення m , анізотропного метадіелектричного перетворювача, від кута α між однією з кристалографічних осей і ребром пластини a , при фіксованих коефіцієнтах анізотропії метадіелектричного матеріалу.

Отримані результати. Вперше досліджено особливості перетворення електричного поля анізотропним метасередовищем при від'ємному значенні діелектричної проникності в одному з обраних головних кристалографічних напрямків. Установлено, що у момент прикладання до верхньої та нижньої граней $a \times b$ анізотропної метадіелектричної пластини, яка є основою анізотропного метадіелектричного перетворювача, деякої різниці потенціалів ΔU призводить до поляризації її об'єму та виникнення як поздовжньої \vec{E}_{\parallel} , так і поперечної \vec{E}_{\perp} складових вихрового електричного поля. Така ситуація веде до аксіального згортання її внутрішнього поля, яка у свою чергу зумовлює появу мікрівихорів електричного поля, що подаються виразом $\text{rot } \vec{E} = \omega$, де ω – кругова частота обертання мікрівихору, а знаки «+» та «-» – позначають напрямок його обертання. Такі аксіальні електричні мікрівихори є ефективним механізмом, що перекачує енергію між фізичним вакуумом і в нашому випадку, анізотропною метадіелектричною пластинною перетворювача.

Проведено аналіз залежності коефіцієнта перетворення m цього середовища від значення анізотропії $K = \epsilon_{11} / \epsilon_{22}$. Дослідження продемонстрували, що у інтервалі $0 < K_1 < 1$ величина m характеризується від'ємним значенням, а в інтервалі $1 < K_2 < \infty$ – додатнім, це дозволило визначити області стабільного існування різних видів енергії.

Використання метадіелектричного матеріалу в порівнянні із класичним характеризується значеннями $m > 1$. Зазначимо, що в окремих випадках спостерігається аномальне зростання згаданого коефіцієнта.

Наукова новизна. З використанням уявлень вихрової електродинаміки запропоновано механізм енергетичної взаємодії між вихровим електричним полем анізотропного метасередовища та фізичним вакуумом.

Практична цінність. Запропоновано модель оригінальної конструкції анізотропного метадіелектричного перетворювача. Визначено області його практичного використання у вигляді генераторів електрики, тепла та холоду, отримано розрахункові вирази для їх коефіцієнта корисної дії, що знаходиться в інтервалі $\eta = 0,5 \div 0,98$, а температура охолодження може досягати температури рідкого гелію.

Ключові слова: анізотропні метасередовища; діелектрична проникність; перетворення; електрична потужність; коефіцієнт корисної дії; нагрівання; охолодження; генерація.

I. ВСТУП

Особливості електричних явищ у класичних анізотропних діелектричних середовищах [1]-[4] зумовили появу нового методу, а також ряду оригінальних пристроїв для трансформації як змінних, так і постійних електричних полів, які дозволяють розширити практичні можливості електротехніки, а також пов'язаних з нею галузей.

Коефіцієнт трансформації n класичного анізот-

ропного діелектричного трансформатора представляється формулою [3, 4]:

$$n = m \cdot f \quad (1)$$
$$m = \frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}} = \frac{(\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \alpha \cos \alpha}{\epsilon_{11} \cos^2 \alpha + \epsilon_{22} \sin^2 \alpha},$$

де m – коефіцієнт перетворення класичного анізотропного матеріалу пластини, $f = a/b$ коефіцієнт її

форми.

Дослідження значень коефіцієнта перетворення m на екстремум по куту α ($dm/d\alpha = 0$) – показала, що максимум величини m спостерігається при куті $\alpha_{max.} = \arctg \sqrt{\varepsilon_{11}/\varepsilon_{22}}$

$$m_{max.} = m(\alpha_{max.}) = \frac{\sqrt{K(K-1)}}{2K}, \quad (2)$$

де $K = \varepsilon_{11}/\varepsilon_{22}$.

При цьому слід зазначити, що у разі використання класичних анізотропних діелектричних матеріалів величина коефіцієнта перетворення m плавно зростає в порівнянні зі зростанням коефіцієнта K , безпосередньо залежить від вибору матеріалів і у зв'язку з цим досить обмежена.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У 1931 р. П. Діраком було показано можливість існування станів з від'ємним значенням діелектричної (ε) та магнітної (μ) проникності в області гелієвих температур.

Фізичну інтерпретацію ефекту, що викликає від'ємні значення ε і μ речовин, названих згодом метаматеріалами вперше представив у 1967 р. В.Г. Веселаго [5], експериментально підтверджено американськими дослідниками Каліфорнійського університету Сан-Дієго в 2000 році [6].

На сьогодні у цьому напрямі опубліковано понад 1000 робіт, переважно у галузях оптики, радіофізики, та інші.

У цьому повідомленні представлені результати попередніх досліджень щодо можливості використання анізотропних метадіелектричних матеріалів для перетворення електричного поля.

III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження особливостей перетворення енергії електричного поля анізотропним метасередовищем при від'ємному значенні діелектричної проникності в одному з обраних головних кристалографічних напрямків. Розробка оригінальної конструкції анізотропного метадіелектричного перетворювача та моделювання його робочих режимів.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Модель анізотропного метадіелектричного перетворювача (АМДП)

Розглянемо анізотропне середовище, тензор діелектричної проникності $\hat{\varepsilon}$ якої, в головних кристалографічних осях OX , OY , OZ має такий вигляд:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_0 \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -\varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Один із варіантів такого анізотропного метадіелектричного середовища є чергуюча шарувата структура на основі діелектриків з додатнім та від'ємним значеннями коефіцієнтів діелектричної проникності ε .

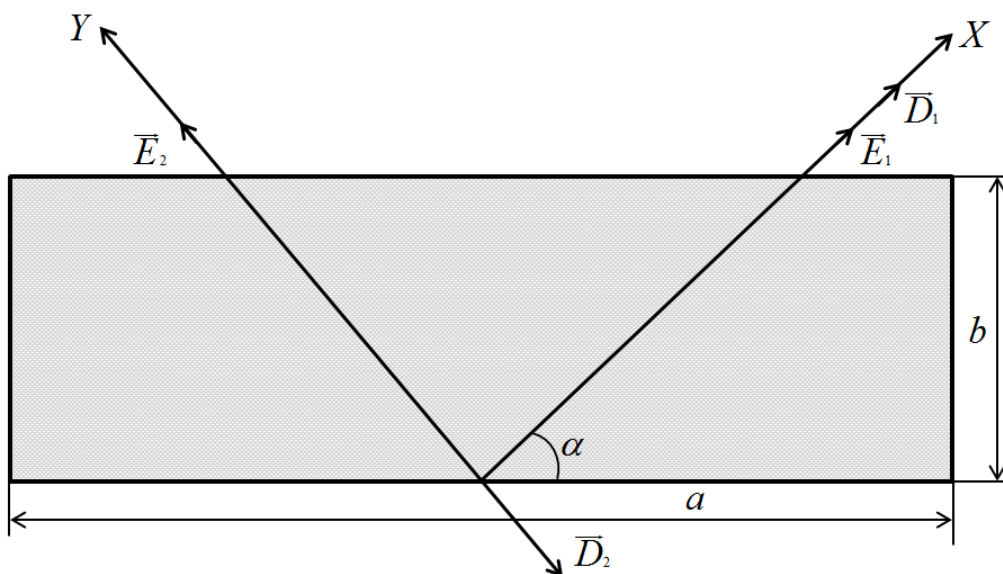


Рисунок 1. Орієнтація кристалографічних осей OX , OY та OZ анізотропної метадіелектричної пластини та розташування векторів електричних полів \vec{E}_1 , \vec{E}_2 , та індукції \vec{D}_1 , \vec{D}_2

Створення з такого матеріалу прямокутної пластини розмірами $a \times b \times c$ ($a \approx c \gg b$) кристалографіч-

ні осі OX та OY якої розміщені в площині її бічної грані $a \times b$, а одна з цих осей розташована під деяким кутом α до ребра a ($0 < \alpha < 90^\circ$) (Рис. 1), дозволяє представити тензор $\hat{\varepsilon}$ наступним чином:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_0 \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} \cos^2 \alpha - \varepsilon_{22} \sin^2 \alpha & (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & \varepsilon_{11} \sin^2 \alpha - \varepsilon_{22} \cos^2 \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{vmatrix} \quad (4)$$

що характеризується наявністю як поздовжньої (ε_{\parallel}) так і поперечної (ε_{\perp}) складових

$$\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_0 (\varepsilon_{11} \cos^2 \alpha - \varepsilon_{22} \sin^2 \alpha) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_0 (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (6)$$

При цьому коефіцієнт перетворення m такої пластини має такий вигляд

$$m = \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} = \frac{(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \sin \alpha \cos \alpha}{\varepsilon_{11} \cos^2 \alpha - \varepsilon_{22} \sin^2 \alpha} \quad (7)$$

Проведені чисельні оцінки показують, що при $a \approx c \gg b$ крайовими умовами на торцевих $b \times c$ і на бічних $a \times b$ гранях можна знехтувати [3].

Дослідження функції

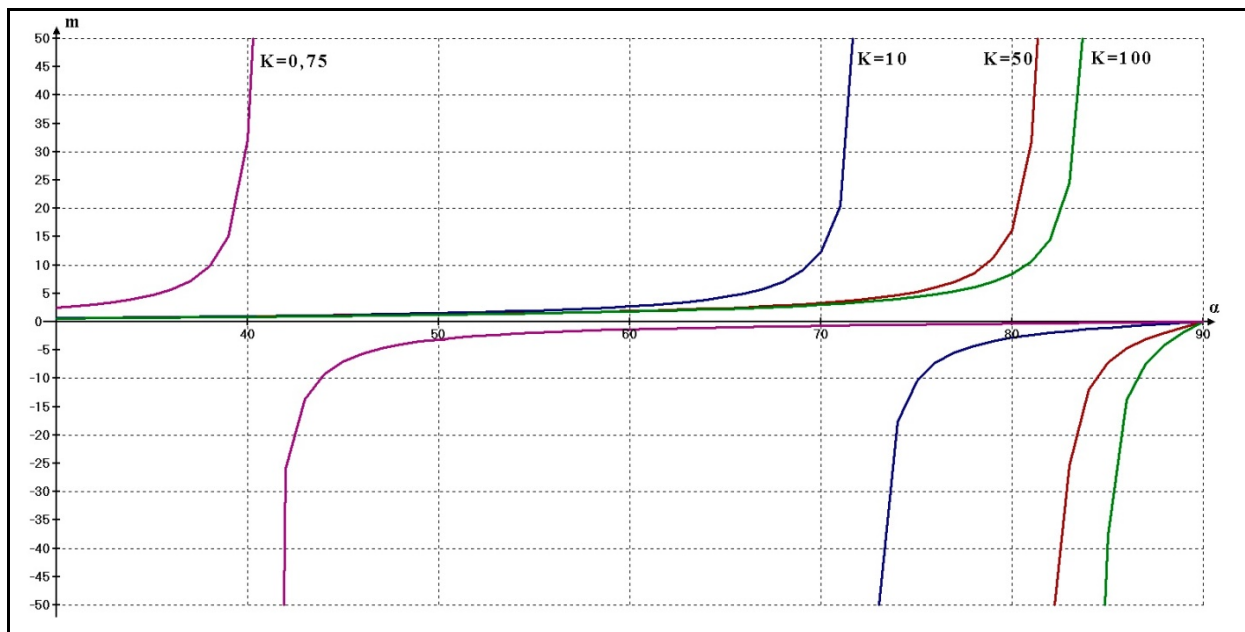


Рисунок 2. Залежність коефіцієнта перетворення m АМДП від кута α при фіксованих коефіцієнтах анізотропії метадіелектричного матеріалу $K=0,75; 10; 50; 100$. α

Таким чином, використання метаматеріалу з від'ємним значенням коефіцієнта діелектричної проникності ε_{22} в одному з основних кристалографічних напрямів веде до аномального зростання значення

$$m(K, \alpha) = \frac{(K+1) \operatorname{tg} \alpha}{K - \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (8)$$

на екстремум ($\partial m / \partial \alpha = 0, \partial^2 m / \partial \alpha^2 < 0$) демонструє, що точки екстремум функції відсутні.

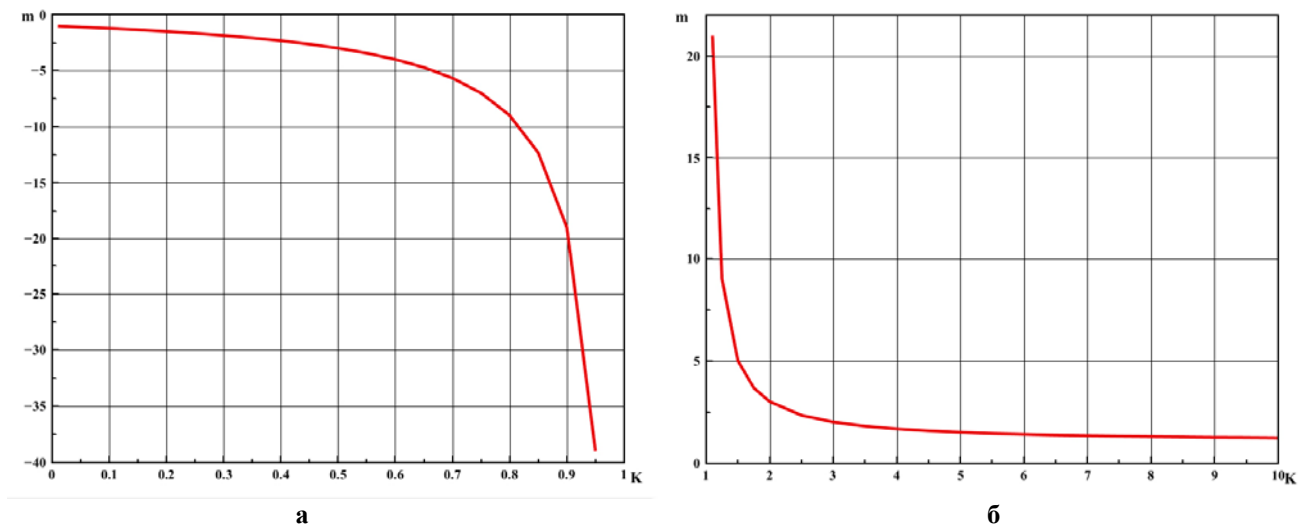
Слід зазначити, що величиною коефіцієнта m анізотропного метадіелектричного матеріалу можна варіювати в широких межах шляхом підбору оптимального кута α_{opt} . Таку можливість продемонстровано на рис. 2. для чотирьох анізотропних метадіелектричних матеріалів з коефіцієнтами анізотропії 0,75, 10, 50 і 100. З цього графіка випливає, що завжди існує можливість підбору кута α_{opt} для заданого m з необхідною величиною і знаком.

У разі $\alpha_{opt} = 45^\circ$ формула (7) матиме наступний вигляд

$$m = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}} = \frac{K+1}{K-1} \quad (9)$$

коефіцієнта перетворення m , АМДП.

Пояснення цього явища з першим наближенням можна представити з використанням уявлень вихрової електродинаміки та фізичного вакууму.



а) Залежність коефіцієнта перетворення m АМДП від величини анізотропії при $0 < K_1 < 1$ та куті $\alpha_{opt.} = 45^\circ$;

б) Залежність коефіцієнта перетворення m АМДП від величини анізотропії при $1 < K_2 < \infty$ та куті $\alpha_{opt.} = 45^\circ$.

Рисунок 3. Залежність коефіцієнта перетворення m АМДП від величини анізотропії до діелектричного метаматеріалу при $\alpha_{opt.} = 45^\circ$

Відповідно до [5]-[9] від'ємне значення діелектричної проникності метаматеріалів пояснюється антипаралельним розташуванням векторів фазової \vec{V}_ϕ та груповий \vec{V}_B швидкостей електричного поля \vec{E} .

У разі АМДП значення коефіцієнтів K_1 та K_2 анізотропного метадіелектричного матеріалу визначаються вибраними кристалографічними напрямками. У першому кристалографічному напрямку OX (рис. 1) розташування векторів \vec{V}_ϕ і \vec{V}_B взаємопаралельне (класичний), а в напрямку OY – вектора \vec{V}_ϕ і \vec{V}_B орієнтуються антипаралельно (мета).

Прикладання до верхньої та нижньої граней $a \times b$ такої пластини (рис. 1) деякої різниці потенціалів $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ призводить до поляризації її об'єму та виникнення як поздовжньої $\vec{E}_{||}$, так і поперечної \vec{E}_{\perp} складових вихрового електричного поля [11]. Така ситуація веде до аксіального згортання її внутрішнього поля, що у свою чергу зумовлює появу мікрОВихорів електричного поля, що подаються згідно з [12, 13] таким виразом:

$$\text{rot} \vec{E} = \omega, \quad (10)$$

де $\omega = F(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, a, b, c, \alpha)$ – кругова частота обертання мікрОВихору, знаки «+» та «-» – позначають напрямки його обертання.

Критерій появи вихору запишемо формулою

$$\frac{\partial E_{11}}{\partial x} \neq \frac{\partial E_{22}}{\partial y}, \quad (11)$$

де E_{11}, E_{22} – напруженості електричного поля вздовж вибраних кристалографічних осей.

Такі аксіальні електричні мікрОВихори є ефективним механізмом, що перекачує енергію між фізичним вакуумом і в нашому випадку, АМДП.

Як відомо, фізичний вакуум [14]-[16] являє собою високосиметричну структуровану вихрову систему, що характеризується наявністю надвисокої кількості енергії. У загальному випадку вона представляється у наступному вигляді [15].

$$W = A \cdot \sum_{n=1}^{\infty} 0,5 \hbar \omega, \quad (12)$$

де A – коефіцієнт, \hbar – постійна Планка; ω – кругова частота;

Залежно від напрямку обертання мікрОВихорів пластини, що визначається величиною анізотропії коефіцієнта K матеріалу пластини при $1 < K_2 < \infty$ – правостороннє, а при $0 < K_1 < 1$ – лівостороннє – фізичний вакуум відповідно віддає енергію АМДП або приймає її від перетворювача.

Таким чином, запропонована модель, дозволяє представити оригінальну технологію створення методу трансформації енергії при високих екологічних показниках.

Застосування описаного АМДП показує, що його коефіцієнт трансформації є наступним виразом

$$n_1 = \frac{(K+1) \text{tg}(\alpha_{opt.})}{K - \text{tg}^2(\alpha_{opt.})} \cdot \frac{a}{b} = m_1 \cdot f \quad (13)$$

і тут спостерігається різке зростання значення коефі-

цієнта трансформації n_1 .

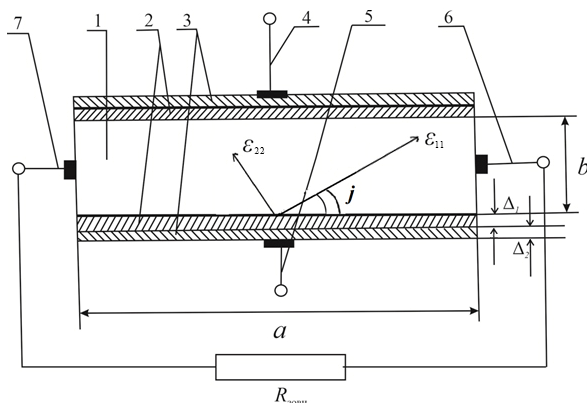
Запропонований метод взаємодії між АМДП та фізичним вакуумом дозволяє здійснювати генерації, як електрики, так і тепла та холоду.

Детальне подання фізико-математичної моделі цього методу планується представити в наступних публікаціях.

Конструктивні особливості АМДП

У загальному випадку вибір конкретної конструкції АМДП визначається як призначенням і функціональними особливостями, так і умовами його експлуатації. Один із можливих варіантів конструкції цього пристрою наведено на Рис. 4.

Основою АМДП [17] є прямокутна пластинка 1 з анізотропного метадіелектричного матеріалу, обрані кристалографічні осі OX і OY якої розташовані в площині бічної грані $a \times b$, при цьому вісь OY орієнтована під деяким кутом α_{opt} до довжини a . Верхня і нижня грані $a \times c$ цієї пластинки містять електроізолюючі шари 2, товщиною Δ_1 з діелектричною проникністю ϵ_c , на зовнішніх сторонах яких розміщені електропровідні шари 3 товщиною Δ_2 з вхідними електричними виводами 4, 5. Вихідні електричні виводи 6, 7 розміщуються на протилежних торцевих гранях $b \times c$.



1 – Пластинка з анізотропного метадіелектричного матеріалу; 2 – електроізоляційні шари; 3 – електропровідні шари; 4, 5 – входи; 6, 7 – вихідні електровиводи.

Рисунок 4. Конструкція АМДП

Аналіз об'ємного розподілу електричного поля пластинки 1 при орієнтації кристалографічної осі OY під кутом α_{opt} (Рис. 1) показав, що наявність електропровідних шарів 3 веде до деякого спотворення розподілу еквіпотенційних поверхонь електричного поля, а отже, і зменшення величини коефіцієнта перетворення m .

Якщо ж вісь OY розташувати під кутом $j = \alpha_{opt} - \beta$, то еквіпотенційні поверхні електричного поля розташовуються паралельно граням $a \times c$, (Рис. 5) при цьому значення коефіцієнта перетворення АМДП визначається виразом:

$$n_3 = \frac{(\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin j \cos j}{\epsilon_{11} \cos^2 j + \epsilon_{22} \sin^2 j} \cdot \frac{a}{b}. \quad (14)$$

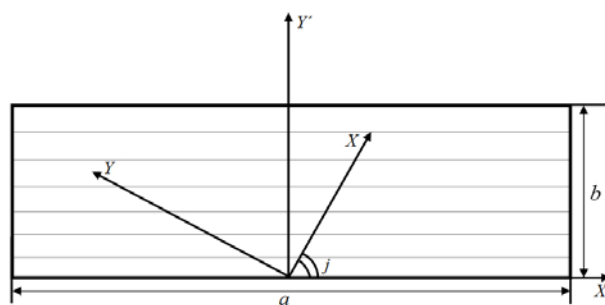


Рисунок 5. Розподіл еквіпотенційних поверхонь електричного поля при орієнтації осі OY під кутом $j = \alpha_{opt} - \beta$.

Величина кута β у цьому випадку впливає з наступного виразу:

$$\beta = \arctg \frac{\epsilon_{11} - \epsilon_{22}}{\epsilon_{11} + \epsilon_{22}}. \quad (15)$$

Таке конструктивне рішення практично повністю усуває вплив електропровідних шарів 3 на об'ємний розподіл еквіпотенційних електричних поверхонь АМДП, що розглядається, а також може призвести до деякого зростання коефіцієнта перетворення.

Еквівалентна схема електричного заміщення цього пристрою щодо електричних виводів 4 і 5 являє собою три послідовно з'єднані конденсатори C_1 , C_2 , C_3 (конденсатори C_1 , C_3 утворені електропровідним шаром 3 і поверхнями $a \times c$ з двох сторін пластинки C_2 – верхньої та нижньої поверхнями $a \times c$. При цьому

$$C_1 = C_3 = \epsilon_c \cdot (ac/\Delta_1), \quad (16)$$

$$C_2 = 0,5 \cdot (\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) \cdot (bc/a). \quad (17)$$

Оскільки $\epsilon_c \gg (\epsilon_{11} + \epsilon_{22})$, а $b \gg \Delta_1$, то $C_1 = C_3 \gg C_2$, а значить, практично вся різниця потенціалу ΔU , що підключається до електровиводів 4, 5, виявляється, прикладена безпосередньо до верхньої і нижньої граней $a \times c$ пластинки 1.

Поперечна різниця потенціалів ΔU_{\perp} , виникає між торцевими гранями $b \times c$ пластинки, утворює вихідну ємність C_4 .

$$C_4 = 0,5 \cdot (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \cdot \frac{bc}{a}. \quad (18)$$

Необхідно відзначити, що анізотропний метадіелектричний матеріал являє собою шарувату структуру, що чергується, на основі шарів класичного діелектрика 1 товщини τ_1 та метадіелектрика 2 товщини τ_2 . Методика розрахунку цієї структури та її оптимізації аналогічної методики наведеної у [16].

Таким чином, підбираючи відповідне значення коефіцієнта анізотропії до матеріалів анізотропної пластини, а також її геометричні розміри, ми отримуємо можливість створення АМДП з необхідними параметрами.

Робочі режими АМДП

Режим створення електричного поля. У цьому випадку анізотропний метадіелектричний матеріал характеризується додатнім значенням коефіцієнта перетворення m ($1 < K_2 < \infty$) та орієнтацією кристолографічної осі ε_{11} під деяким обраним оптимальним кутом $\alpha_{opt.}$ [18].

Схема такого генератора складається з АМДП, вхідні електровиводи 4, 5 якого підключені до зовнішнього джерела електроенергії створюваної генератором, що задає. До вихідних електровиводів 6, 7 підключено зовнішнє навантаження, опором Z .

При подачі деякої потужності $P(t) = P_0 \sin(\omega t)$ на вхід АМДП, в об'ємі пластини 1 виникають електричні вихори, що взаємодіють з фізичним вакуумом. Це веде до виникнення енергетичного потоку спрямованих із фізичного вакууму в об'єм АМДП, при додатному напівперіоді енергія фізичного вакууму поглинається пристроєм проходячи через одну з бічних граней АМДП, при від'ємному значенні через протилежну бічну грань ($a \times b$). Зрештою, це призводить до появи на вихідних електровиводах 6, 7 електричної потужності, $P_{вих.}$ яка представляється в наступному вигляді:

$$P_{вих.} = P_0 \sin(\omega t_0) \frac{(K+1) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{opt.})}{K - \operatorname{tg}^2(\alpha_{opt.})}, \quad (19)$$

таким чином, правостороннє обертання електричних мікрівихорів зумовлює можливість роботи АМДП у режимі генерації електричної енергії.

Коефіцієнт корисної дії η_I у цьому випадку виглядає так:

$$\eta_I = \frac{I}{I + \frac{(K+1) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{opt.})}{K - \operatorname{tg}^2(\alpha_{opt.})} + \operatorname{tg} \delta}, \quad (20)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ – діелектричні втрати матеріалу пластини 1.

Максимальне значення електричної потужності $P_{max.}$, яку може генерувати АМДП, визначається наступним виразом:

$$P_{max.} = (s \cdot M \cdot \Delta T) / \operatorname{tg} \delta, \quad (21)$$

де $M = a \cdot b \cdot c \cdot d$ – маса пластини; d – щільність її матеріалу; s – питома теплоємність матеріалу; T_0 – температура довкілля; $T_{сп.}$ – гранична робоча температура матеріалу, пластини 1.

У таблиці 1 наведено деякі характеристики запропонованого пристрою з різним значенням коефіцієнта анізотропії K_2 , коефіцієнт форми АМДП $f = 0,1$.

Аналіз цих даних показує зростання величини E_{\perp} та P_{\perp} із зменшенням анізотропії K матеріалу пластини.

Таблиця 1. Характеристики АМДП з коефіцієнтом форми $f = 0,1$.

Коефіцієнт анізотропії $K = \varepsilon_{11} / \varepsilon_{22}$	Величина електричного поля $E_{\parallel} \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$	Величина електричного поля $E_{\perp} \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$	Величина потужності $P_{\parallel} \text{ Вт}$	Величина потужності $P_{\perp} \text{ Вт}$
2	1	30	1	27
1,5	1	50	1	125
1,2	1	110	1	1331
1,1	1	210	1	9261
1	1	0	1	0

Слід зазначити, що при певних умовах АМДП, що розглядається, також може активно функціонувати в режимі генерації теплової потужності.

Режим охолодження, утилізації та акумуляції. Як зазначалося вище, лівостороннє обертання електричних мікрівихорів пластини призводить до зменшення внутрішньої енергії АМДП. Це веде відповідне зниження температури T анізотропної пластини [19].

При додатному напівперіоді потужності, що подається на вхід АМДП частина його внутрішньої енергії поглинається фізичним вакуумом через одну з бічних граней ($a \times b$), при від'ємному напівперіоді –

через протилежну бічну грань ($a \times b$).

У цьому випадку холодопродуктивність Q визначається таким чином [20]:

$$Q = W_{вих.} \frac{(K+1) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{opt.})}{K - \operatorname{tg}^2(\alpha_{opt.})}, \quad (22)$$

а різниця температур ΔT між навколишнім середовищем та АМДП, що досягається при адіабатичній ізоляції граней пластини,

$$\Delta T = (Q - q_{вт.}) / (s \cdot M), \quad (23)$$

де $q_{вт.}$ – втрати, зумовлені охолодженням діелектри-

чних та металевих шарів на верхній та нижній гранях перетворювача, s – теплоємність, M – його маса.

Коефіцієнт корисної дії η_2 аналізованого процесу охолодження представляється так:

$$\eta_2 = \frac{1}{1 + \frac{(K+1) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{\text{opt.}})}{K - \operatorname{tg}^2(\alpha_{\text{opt.}})} + \operatorname{tg} \delta}, \quad (24)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ – діелектричні втрати матеріалу пластини.

У таблиці 2 наведено чисельні значення холодопродуктивності Q АМДП залежно від величини коефіцієнта анізотропії K .

Таблиця 2. Значення холодопродуктивності АМДП

D_{ex}	1	1	1	1	1
K	0,1	0,5	0,9	0,95	0,98
Q	1,2	3	19	37	99

За значення $K_1 = 0,1 \div 0,98$ та $\operatorname{tg} \delta = 10^{-2}$ коефіцієнт η_2 знаходиться в межах $\eta_2 = 0,5 \div 0,98$ та холодопродуктивності $\theta = 1,2 \div 9,8$ Вт.

Результати проведених досліджень показують перспективність використання даного пристрою, як високоефективних холодильних елементів. Даний метод дозволяє здійснювати ефективну утилізацію та акумуляцію теплової енергії, що виділяється, як конкретних об'єктів, різних приладів і пристроїв, перекачуючи її в середовище фізичного вакууму.

Поруч із розглянутим вище вихровим пристроєм АМДП дозволяє посилювати різні сигнали у широкому спектральному діапазоні; ефективно працювати як випромінювач у широкому спектральному діапазоні; при відповідному підборі оптичних матеріалів функціонувати як генератор променевої енергії в ІЧ-, видимій, УФ-, та рентгенівському спектрах; як пристрій сполучення антенних пристроїв з приймально-передаючих систем і т.д.

V. ВИСНОВКИ

Вперше запропоновано оригінальну фізичну модель енергетичної взаємодії між вихровим електричним полем пластини анізотропного метадіелектричного перетворювача та фізичним вакуумом. Аналіз цієї моделі показує, що в інтервалі $0 < K_1 < 1$ величина коефіцієнта перетворення m характеризується від'ємним значенням, а в інтервалі $1 < K_2 < \infty$ – додатним. У першому випадку спостерігається ефект охолодження у другому – режим генерації електроенергії.

Використання метадіелектричного матеріала в порівнянні із класичним характеризується значеннями $m > 1$.

Визначено галузі практичного застосування АМДП у вигляді генераторів електрики, тепла та холоду, отримано розрахункові вирази для їх

коефіцієнта корисної дії, що знаходиться в інтервалі $\eta=0,5 \div 0,98$, а температура охолодження даного пристрою може досягати температури рідкого гелію.

Запропонована фізична модель сприятиме появі нових науково-технічних напрямків в галузі електрики та напрямках, які пов'язані із нею.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Процес трансформації електрики : пат. 134213 Україна : H02M11/00 / А. А. Ащеулов, Д. О. Лавренюк, І. С. Романюк. – № у 2018 11578; заявл. 26.11.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9 – 4 с.
- [2] Діелектричний трансформатор : пат. 135554 Україна : H02N11/00 / А. А. Ащеулов, Д. О. Лавренюк, І.С. Романюк, М.М. Кондратенко. № у 2019 00052; заявл. 02.01.2019; опубл. 10.07.2019, Бюл. №13 – 4 с.
- [3] Ащеулов А.А., Деревянчук Н.Я., Лавренюк Д.А., Эффект трансформации в анизотропных диэлектрических средах / А.А. Ащеулов, Н.Я. Деревянчук, Д.А. Лавренюк // ТКЭА. – 2020. – №4. – С. 24-27. – Режим доступа: DOI: 10.15222/ТКЭА2020.3-4.24
- [4] Ashcheulov A.A., Derevianchuk M.Ya., Lavreniuk D.A. On the Possibility of Electrostatic Transformation by Anisotropic Dielectric Environment. / A.A. Ashcheulov, M.Ya. Derevianchuk, D. A. Lavreniuk// American Journal of Engineering Research (AJER). – 2021. – Vol. 10, no. 7 – P. 112-118. e-ISSN: 2320-0847 p-ISSN : 2320-0936
- [5] Veselago V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . / V. G. Veselago // Sov. Phys. Usp., – 1968 Vol. 10. – P. 509-514. – Mode access: DOI: 10.1070/PU1968v010n04ABEN003699
- [6] Yeon Ui Lee, Junxiang Zhao, Qian Ma, Larousse Khosravi Khorashad, Clara Posner, Guangru Li, G. Bimananda M. Wisna, Zachary Burns and Jin Zhang,. Metamaterial assisted illumination nanoscopy via random super-resolution speckles. – 2000. UC San Diego
- [7] Kildishev A V, Shalaev V M Transformation optics and metamaterials / A.V. Kildishev, V.M. Shalaev // Phys., – 2011 Usp., 54, P. 53–63 – Mode access: DOI: 10.3367/UFNe.0181.201101e.0059
- [8] Фелинский С.Г., Коротков Д.А., Фелинский С.С. Критерии существования отрицательной диэлектрической проницаемости в кристаллах / С.Г. Фелинский, Д.А. Коротков, С.С. Фелинский // Наноматериалы, нанотехнологии, – 2014, Т. 12, № 36, С. 585-593.
- [9] Поплавко Ю.М. Физика диэлектриков [под ред. Ю.И. Якименко]. – Київ : НТУУ, «КПИ», 2015. – 572 с.
- [10] Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц [2-е

- изд.] / Дж. Най. – Москва : Мир, 1967. – 386 с.
- [11] Самойлович А.Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы преобразования энергии / А.Г. Самойлович. – Черновцы : Рута, 2006. – 226 с.
- [12] Tamm I.E. Fundamentals of the theory of electricity / I.E. Tamm. – Moscow : FIZMATLIT, 2003 – 616 p.
- [13] Боев А.Г. Электромагнитная теория смерча. Электродинамика вихря. / А.Г. Боев // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009 – Т.14, №2, С. 121–149.
- [14] Прохоров А.М. Физическая энциклопедия. [Т.1-Т.5 Справочное издание] / А.М. Прохоров – Москва: Советская энциклопедия, 1988-1998, –704 с., 704 с., 672 с., 704с., 760 с.
- [15] Энергия и физический вакуум / А.Н. Власов [и другие], – Волгоград : Станица-2, 2004. – 192 с.
- [16] Шипов Г.И. Теория физического вакуума / Г.И. Шипов/ – Москва: Наука, 1987. – 451 с.
- [17] Анизотропный электростатичний елемент : пат. Україна : А.А. Ащеулов – № u 2021 04174; заявл. 16.07.2021
- [18] Процес отримання електрики : пат. 149691 Україна : H02L31/052 / А. А. Ащеулов – № u 2021 02559; заявл. 17.05.2021; опубл. 01.12.2021, Бюл. № 48 – 4 с.
- [19] Процес термостатичного охолодження : пат. Україна : А.А. Ащеулов – № u 2021 03958; заявл. 07.07.2021
- [20] Ащеулов А.А., Деревянчук Н.Я., Лавренюк Д.А., Романюк И.С. Трансформация электрического тока анизотропной электропроводной средой / Ащеулов А.А., Деревянчук Н.Я., Лавренюк Д.А., Романюк И.С // ТКЭА. – 2020. – № 5-6, с. 28-32. – Режим доступа: DOI: 10.15222/ТКЭА2020.5-6.28

Стаття надійшла до редакції 01.12.2021

АНИЗОТРОПНЫЙ МЕТАДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

- АЩЕУЛОВ А.А. д-р техн. наук, профессор, Института термоэлектрики НАН і МОН України, Черновці, Україна, e-mail: ashcheulovaa@rambler.ru;
- ДЕРЕВЯНЧУК Н.Я. аспирант, Черновицький національний університет імені Юрія Федьковича, Черновці, Україна, e-mail: m.derevianchuk@ukr.net;
- ЛАВРЕНЮК Д.О. інженер, Черновицький національний університет імені Юрія Федьковича, Черновці, Україна, e-mail: lavreniuk.dmytro.clg@chnu.edu.ua

Цель работы. Исследование особенностей преобразования энергии электрического поля анизотропной метасредой при отрицательном значении диэлектрической проницаемости в одном из выбранных главных кристаллографических направлений.

Методы исследования. Проведены исследования с применением методов физико-математического моделирования анизотропного метадиэлектрического преобразователя; с использованием методов оптимизации функции зависимости коэффициента преобразования t , анизотропного метадиэлектрического преобразователя, от угла α между одной из кристаллографических осей и ребром пластин a , при фиксированных коэффициентах анизотропии метадиэлектрического материала.

Полученные результаты. Впервые исследованы особенности преобразования электрического поля анизотропной метасредой при отрицательном значении диэлектрической проницаемости в одном из выбранных главных кристаллографических направлений. Установлено, что в момент приложения к верхней и нижней граням анизотропной метадиэлектрической пластины, которая является основой анизотропного метадиэлектрического преобразователя, некоторой разности потенциалов приводит к поляризации ее объема и возникновению как продольной, так и поперечной составляющих вихревого электрического поля. Такая ситуация ведет к аксиальному сворачиванию ее внутреннего поля, что в свою очередь приводит к появлению микровихрей электрического поля, которые описываются выражением $\text{rot } \vec{E} = \omega$ где ω – круговая частота вращения микровихря, а знаки «+» и «-» – обозначают направление его вращения. Такие аксиальные электрические микровихри являются эффективным механизмом, перекачивающим энергию между физическим вакуумом и в нашем случае, анизотропной метадиэлектрической пластиной преобразователя.

Проведен анализ зависимости коэффициента преобразования t этой среды от значения анизотропии $K = \epsilon_{11} / \epsilon_{22}$. Исследования продемонстрировали, что в интервале $0 < K_1 < 1$ величина t характеризуется отрицательным значением, а в интервале $1 < K_2 < \infty$ – положительным, это позволило определить области стабильного существования разных видов энергий.

Использование метадиэлектрического материала по сравнению с классическим характеризуется значе-

ниями $m > 1$. Отметим, что в редких случаях наблюдается аномальный рост упоминаемого коэффициента.

Научная новизна. С использованием представлений вихревой электродинамики предложен механизм энергетического взаимодействия между энергиями электрического поля анизотропной метасреды и физического вакуума.

Практическая ценность. Предложена модель оригинальной конструкции анизотропного метадиелектрического преобразователя. Определены области практического использования анизотропного метадиелектрического преобразователя в виде генераторов электричества, тепла и холода, получены расчетные выражения для их коэффициента полезного действия, находящегося в интервале $\eta = 0,5 \div 0,98$, а температура охлаждения может достигать температуры жидкого гелия.

Ключевые слова: анизотропные метасреды; диэлектрическая проницаемость; превращение; электрическая мощность; коэффициент полезного действия; нагрев; охлаждение; генерация.

ANISOTROPIC METADIELECTRIC CONVERTER

- ASHCHEULOV A.A. Sci.D, Professor, Institute of thermoelectricity NAS and MES of Ukraine, Chernivtsi, Ukraine, e-mail: ashcheulovaa@rambler.ru;
- DEREVIANCHUK M.YA. Postgraduate student, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, e-mail: m.derevianchuk@ukr.net;
- LAVRENIUK D.O. Engineer, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, e-mail: lavreniuk.dmytro.clg@chnu.edu.ua

Purpose. Investigation of the peculiarities of the electric field energy conversion by an anisotropic meta-medium with a negative value of the dielectric constant in one of the selected main crystallographic directions.

Methodology. Research was carried out using methods of physical and mathematical modeling of anisotropic metadielectric converter; using methods to optimize the function of the dependence of the conversion factor m , anisotropic metadielectric converter, on the angle α between one of the crystallographic axes and the edge of the platinum a , at fixed anisotropy coefficients of metadielectric material.

Findings. For the first time, the peculiarities of the electric field transformation by an anisotropic meta-medium with a negative value of the dielectric constant in one of the selected main crystallographic directions were studied. It is established that at the moment of application to the upper and lower faces $a \times b$ of the anisotropic metadielectric plate, which is the basis of the anisotropic metadielectric converter, some potential difference ΔU leads to polarization of its volume and the emergence of both longitudinal \vec{E}_{\parallel} and transverse \vec{E}_{\perp} components of the vortex electric field. This situation leads to axial folding of its internal field, which in turn causes the appearance of micro-vortices of the electric field, given by the expression $\text{rot } \vec{E} = \omega$, where ω - the circular time of rotation of the micro-vortex, and signs "+" and "-" - indicate the direction of its rotation. Such axial electric micro vortices are an efficient mechanism that pumps energy between the physical vacuum and, in our case, the anisotropic metadielectric plate of the transducer.

The dependence of the transformation coefficient m of this medium on the value of anisotropy $K = \varepsilon_{11} / \varepsilon_{22}$ is analyzed. Studies have shown that in the interval $0 < K_1 < 1$ the value of m is characterized by a negative value, and in the interval $1 < K_2 < \infty$ - positive, this allowed us to determine the areas of stable existence of different types of energy.

The use of metadielectric material in comparison with the classical one is characterized by values of $m > 1$. Note that in some cases there is an abnormal increase in the coefficient.

Originality. Using the representations of vortex electrodynamics, the mechanism of energy interaction between the vortex electric field of an anisotropic metaenvironment and the physical vacuum is proposed.

Practical value. A model of the original design of an anisotropic metadielectric converter is proposed. Areas of its practical use in the form of generators of electricity, heat and cold are determined, calculated expressions for their efficiency are in the range $\eta = 0.5 \div 0.98$, and the cooling temperature can reach the temperature of liquid helium.

Keywords: anisotropic metaenvironments; the dielectric constant; transformation; electric power; efficiency; heat; cooling; generation.

REFERENCES

- [1] Asheulov, A.A., Lavreniuk, D.O., Romaniuk, I.S. (2019) Electricity transformation process. *Patent of Ukraine 134213*, 9.
- [2] Asheulov, A.A., Lavreniuk, D.O. (2019) Dielectric transformer. *Patent of Ukraine 135554*, 13.
- [3] Asheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ya., Lavreniuk, D.O. (2020) Transformation effect in anisotropic dielectric media. *TKEA*, 4, 23. DOI: 10.15222/TKEA2020.3-4.24
- [4] Ashcheulov, A., Derevianchuk, M., Lavreniuk, D. (2021) On the Possibility of Electrostatic Transformation by Anisotropic Dielectric Environment. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 10, 7, 112-118. e-ISSN: 2320-0847 p-ISSN: 2320-0936
- [5] Veselago, V. G. (1968) The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov. Phys. Usp.*, 10, 509-514; DOI: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699
- [6] Lee, Y., Zhao, J., Ma, Q., Khorashad, L., Posner, C., Li, G., Bimananda, G., Wisna, M., Burns, Z. and Zhang, J. (2000) Metamaterial assisted illumination nanoscopy via random super-resolution speckles. UC San Diego
- [7] Kildishev, A V, Shalaev, V M (2011) Transformation optics and metamaterials. *Phys., Usp.*, 54, 53-63 DOI: 10.3367/UFNe.0181.201101e.0059
- [8] Felinsky, S.G., Korotkov, D.A., Felinsky, S.S. (2014) Criteria for the existence of negative dielectric constant in crystals. *Nanomaterials, nanotechnology*, 12, 585-593.
- [9] Poplavko, Yu.M. (2015) Physics of dielectrics [ed. Yu.I. Yakimenko] K.-NTUU, KPI, 572.
- [10] Nye, J. (1967) Physical properties of crystals and their description using tensors and matrices. I. Mir, 267.
- [11] Samoilovich, A.G. (2006) Thermoelectric and thermomagnetic methods of energy conversion. Chernivtsi, Ruta, 226.
- [12] Tamm, I.E. (2003) Fundamentals of the theory of electricity. Moscow: FIZMATLIT, 616.
- [13] Boev, A.G. (2009) Electromagnetic theory of tornado. Vortex electrodynamics. *Radiophysics and Radio Astronomy*, 14, 2, 121-149.
- [14] Prokhorov, A.M. (1988-1998) Physical encyclopedia. T.1-T.5 Reference edition, Moscow, Soviet encyclopedia, 704, 704, 672, 704, 760.
- [15] Vlasov, A.N., Goncharov, N.V., Grebenchenko, Yu.I., Olshansky, O.V., Tuzhikov, O.O. (2004) Energy and physical vacuum, Volgograd: Stanitsa-2, 192.
- [16] Shipov, G.I. (1987) Theory of physical vacuum, Moscow: Nauka, 451.
- [17] Ashcheulov, A.A. Anisotropic electrostatic element. Application u 2021 04174. Date of application submission 16.07.2021.
- [18] Asheulov, A.A. (2021) Electricity transformation process. *Patent of Ukraine 149691*, 48.
- [19] Asheulov, A.A (2021) The process of thermostatic cooling. Application u 2021 03958. Date of application submission 07.07.2021.
- [20] Ashcheulov A.A., Derevianchuk M.Ya., Lavrenyuk D.A., Romanyuk I.S. (2020) Transformation of electric current by anisotropic electrically conductive medium. *TCEA.*, 5-6, 28-32. DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.28

ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ЗАПИЛЕНОСТІ ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ НА ГЕНЕРАЦІЮ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОЮ СТАНЦІЄЮ ЗА ДОПОМОГОЮ MATLAB

- ШЕВЧЕНКО С.Ю.** доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Sergii.Shevchenko@khp.edu.ua;
- ДАНИЛЬЧЕНКО Д.О.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: dmytro.danylchenko@khp.edu.ua;
- БІЛИК С.Ю.** канд. техн. наук, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Serhii.Bilyk@khp.edu.ua;
- ПОТРИВАЙ А.Е.** студент, кафедри передавання електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: potryvay.andrew99@gmail.com@gmail.com;
- КОВТУН Г.А.** студент, кафедри промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: georgij.kovtun@gmail.com;

Мета роботи. Вдосконалення імітаційної моделі сонячної електростанції за допомогою створення блок-моделі врахування запиленості поверхні фотоелектричних модулів при розрахунку ефективності генерації електричної енергії сонячною станцією.

Методи дослідження. Використання методів статистичної обробки даних, та моделювання в структурі засобів Matlab.

Отримані результати. Створено математичну модель, яка дозволяє враховувати вплив запиленості поверхні фотоелектричних модулів на ефективність генерації електричної енергії сонячною станцією. Модель перевірено на реальному об'єкті та доведено точність моделювання.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає в створенні математичних моделей, що описують вплив запиленості поверхні фотоелектричних модулів на ефективність генерації сонячної станції на основі закону Бугера-Ламберта-Бера, розроблено блоки впливу опадів на запиленість та скорегована швидкість накопичення пилу шляхом урахування вологості повітря.

Практична цінність. Отримані результати допоможуть підвищити точність моделювання всіх типів фотоелектричних систем. Ці моделі можна використовувати як формування комерційних пропозицій з більш точними графіками генерації електричної енергії, що може значно підвищити точність вибору встановленої потужності обладнання.

Ключові слова: активна потужність; реактивна потужність; нормальний розподіл; ексцес; асиметрія; математичне очікування; середнє квадратичне відхилення.

I. ВСТУП

На сьогоднішній день більшість методів прогнозування та розрахунку генерації сонячних електростанцій (СЕС) досить точно справляються зі своїми завданнями. Однак, безліч сучасних систем розрахунку (PVSystem та ін.) генерації та прогнозування не враховують ряд, на перший погляд, не дуже важливих факторів, які в сумі не дають можливості передбачити поведінку фотоелектричної системи (ФЕС) у реальних умовах, характерних для певної місцевості (далі в умовах експлуатації) [1]-[2]. До таких факторів належать: охолодження поверхні фотоелектричного моду-

ля (ФЕМ) залежно від швидкості вітру, облік моделі добової зміни температури повітря та облік запиленості поверхні ФЕС.

II. МЕТА РОБОТИ

Основним завданням цієї роботи є отримання блок-моделі обліку впливу запиленості поверхні фотоелектричних модулів на продуктивність СЕС підвищення точності прогнозування генерації станції за умов експлуатації.

III. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Серед великої кількості існуючих моделей СЕС була обрана одна з таких і представлена в [3], в якій проводиться облік впливу швидкості вітру на охолодження панелі та добова зміна температури, що значно спрощує завдання та наближає до мети: отримання моделі, яка враховуватиме достатньо факторів, щоб стверджувати, що дані після моделювання максимально схожі з показниками генерації під час експлуатації в реальних умовах.

Дана модель передбачає наявність п'яти основних блоків та ряду побічних.

Серед основних: модель сонячної радіації, сонячної батареї (СБ), акумуляторної батареї (АБ), перетворювача та навантаження.

Модель діючої сонячної радіації представлена сумою прямого, відбитого та розсіяного випромінювання на довільно орієнтовану поверхню з азимутом за методом описаним в [4].

Модель генеруючої установки пропонується побудувати за методом, запропонованим Даффі та Бекманом у роботі [5]. Важливою перевагою є те, що у роботі [3] запропоновано замінити коефіцієнт СБ уточнюючим виразом, що підвищує точність моделювання.

Перетворювачі енергії побудовані на основі спрощених моделей. Для обліку роботи трекера точки максимальної потужності (MPPT) використовувався стандартний блок із бібліотеки Simulink. Модель інвертора зроблена на основі ідеальних джерел напруги та струму. Для врахування внутрішніх втрат в інверторі та у сполучному кабелі від акумуляторних батарей введено R_{inv} і R_{pg} .

Моделювання електричного навантаження проводиться на основі імовірісно-статистичної моделі, що розраховується за формулою

$$P_{pi} = \bar{P}_i + \beta\sigma(P_i) \quad (1)$$

де P_{pi} , \bar{P}_i - розрахункове активне навантаження та математичне очікування навантаження на i -й годині добового графіка; β - коефіцієнт надійності розрахунку, визначає ймовірність, з якою випадкові значення навантаження залишаться менше прийнятого розрахункового значення P_{pi} ; $\sigma(P_i)$ - середнє відхилення для i -го ступеня добового графіка.

Для моделювання роботи АБ використовується метод запропонований Тремблеєм і Десентом [6] на основі узагальненого співвідношення Шеферда.

Важливою перевагою моделі [3] є наявність моделі блоку обліку впливу нагріву поверхні ФЕМ, а також облік добового температурного ходу.

На рис. 1 наведена узагальнена схема моделі Matlab.

IV. МЕТОДИКА ВРАХУВАННЯ ЗАПИЛЕНОСТІ ФЕМ

Незважаючи на те, що в моделі з роботи [3] враховано чимало факторів, ключовою проблемою є те, що в ній є значні недоліки і відсутня маса параметрів, які мають значний вплив на генерацію та режими роботи СЕС, характерних для умов експлуатації.

Приміром, недоліком використання моделі сонячної радіації з [4] і те, що облік відбитого випромінювання за умов зими чи великої кількості багатоповерхових будинків призводить до підвищенням очікуванням від генерації ФЭС [8]. Також, значний вплив на продуктивність системи забрудненість поверхні ФЕМ.

За даними дослідження [8], [9] найбільш поширеним видом забруднень ФЕМ є пил (скупчення твердих частинок, діаметром менше 500 мкм).

Спостереження при роботі з СЕС дозволяють стверджувати, що зміна кількості пилу, що осів на поверхні ФЕМ, може бути описано експонентою, що повільно зростає. Тому основою моделі служить формула:

$$N_{nuty}(t) = N_0 e^{rt} \quad (2)$$

де N_0 – початкова кількість пилу що лежить на поверхні; r – швидкість зростання кількості пилу на поверхні.

Значний вплив на швидкість зростання кількості осівшого пилу надає вологість повітря, що необхідно враховувати для формування точного графіка:

$$r = \frac{((\rho - 100) * -1) dN}{NDt} \quad (3)$$

де ρ – вологість повітря у вибраний час дня.

Оскільки сонячне світло є електромагнітним випромінюванням, справедливим є використання як основи розрахунку, що поглинається пилом енергії, закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$G_{втрач} = G_0 e^{-\left(N_0 e^{\frac{(\rho - 100) * (-1) dN}{Ndt}}\right)} \quad (4)$$

Наявність опадів значно впливає на кількість пилу, що осів на поверхню ФЕМ, тому є необхідність у створенні блоку обліку зміни впливу запиленості ФЕМ на продуктивність СЕС залежно від кількості опадів, що випали. Ця залежність представлена у вигляді графіку на рис. 2 [6].

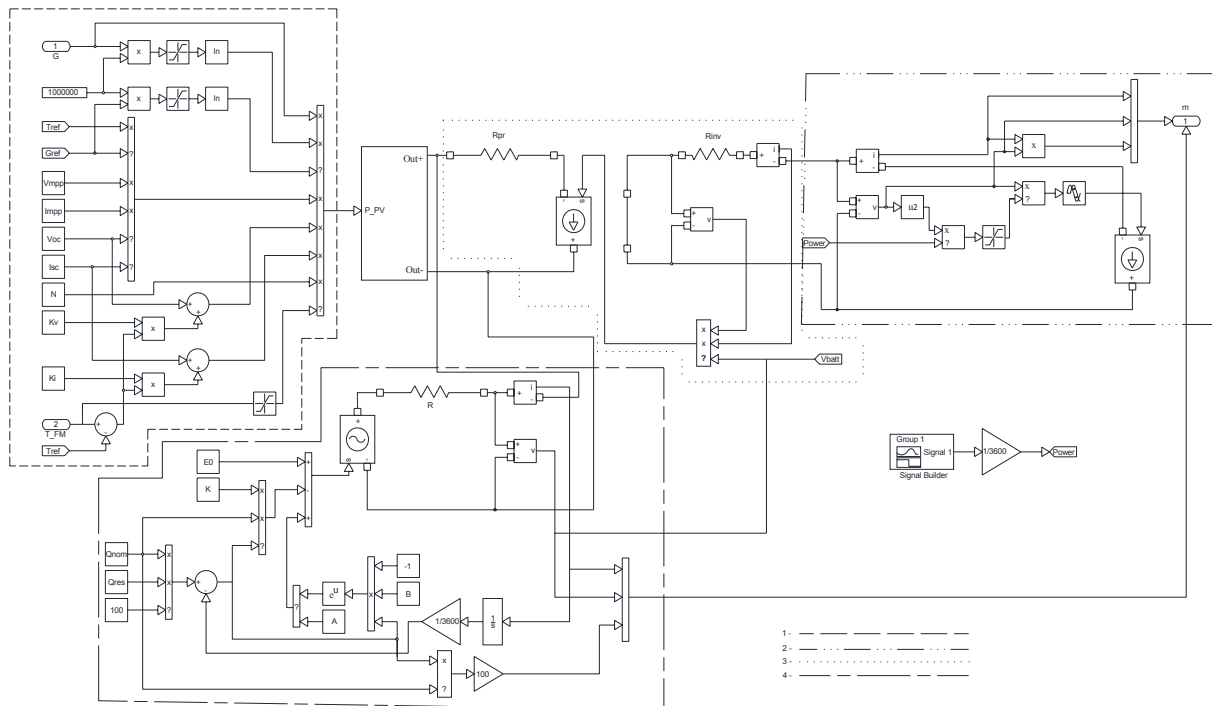


Рисунок 1. Схема математичної моделі перетворювачів: 1. ФЭМ; 2.Навантаження; 3. Інвертор; 4. АБ

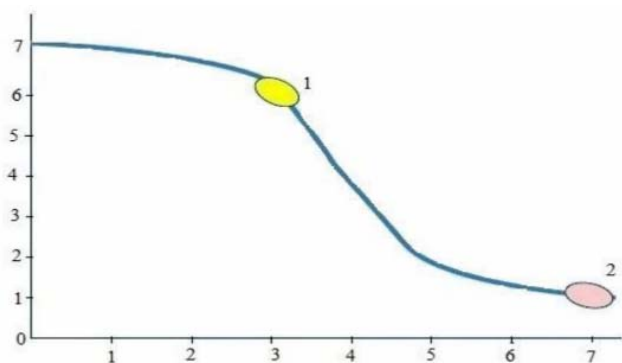


Рисунок 2. Вплив атмосферних опадів на зниження втрат енергії ФЭП

Вертикальна вісь – втрата продуктивності ФЭП, %, горизонтальна – кількість опадів, мм. 1 - початок інтенсивного очищення; 2 - точка, після якої очищення не відбувається.

Досвід випробувань показує, що в діапазоні від 3 до 7 мм опадів відбувається найбільш ефективне очищення поверхні ФЭМ, однак навіть у подібних умовах не повне усунення забруднень. Пояснюється це утвореннями скупчень пилу, видалення яких щоразу стає дедалі складніше, а процес забруднення у наступній одиниці часу починається з вищого рівня за-

брудненості.

Для спрощення роботи з графіком пропонується його реалізувати через дві блок-моделі, оскільки на ньому можна виділити дві зони, які можуть бути описані стандартними функціями.

Першу (від 0 до 2,9 мм опадів) опишемо формулою:

$$\eta_{\text{втрач.уточ}} = \eta_{\text{втрач}} - \frac{\sqrt{Q}}{2} \tag{5}$$

де $\eta_{\text{втрач}}$ – відсоток енергії від тієї, що повідомляється поверхні, що поглинається шаром пилу; Q – рівень опадів у момент часу t .

Другу (від 2,9 до 7 мм) опишемо формулою:

$$\eta_{\text{втрач.уточ}} = \eta_{\text{втрач}} e^{-\left(\frac{dQ}{Qdt}\right)x} \tag{6}$$

Поєднання функцій зроблено за допомогою порівнюючого блоку, який у нашому випадку порівнює значення з постійною (2,9) та спрямовує сигнал на відповідну функцію. Реалізація перерахованих вище запропонованих функцій наведена на рис. 3 і рис. 4.

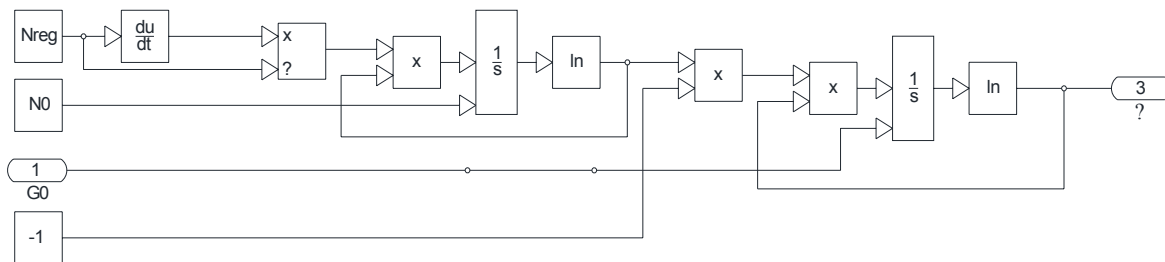


Рисунок 3. Реалізація блоку впливу запиленості поверхні на генерацію ФЕП

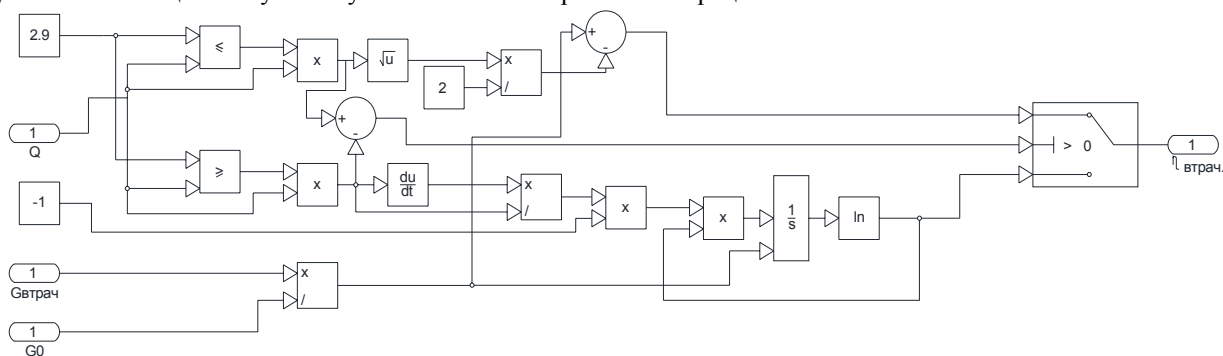


Рисунок 4. Реалізація блоку зміни впливу шару пилу на продуктивність залежно від опадів

V. МОДЕЛЮВАННЯ РЕАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ

Для перевірки роботи запропонованої імітаційної моделі були обрані умови міста Чугуїв (географічні координати 49 ° 50'07 "пн.ш., 36 ° 40'32" с.д.) для характерного літнього дня року (21 червня).

Як об'єкт моделювання прийнято приватну СЕС. Сонячна батарея побудована на основі поліелектричних модулів ALM-340P-144, 9ВВ. Встановлено гібридний інвертор ІМЕОН 9.12. СЕС не має механізму автоматичної орієнтації сонячної батареї на Сонці.

Вихідними даними для моделювання є метеорологічні дані з бази NASA SSE 2020 для міста Чугуїв. Альbedo земної поверхні приймається стандартним: 0,2 – для трав'яного покриву, та 0,8 – для снігового. Середньодобова температура встановлена на рівні 25,25 °С, амплітуда добової зміни температури – 6,1 °С, середня швидкість вітру – 9 м/с, місцевий час максимуму температури – 16 годин дня.

На рис. 5- рис. 7 зображено часові графіки режимних параметрів ФЕС. На рис. 7 графік побудований з урахуванням впливу пилу і температури поверхні, проте це не змінило кардинально вигляд графіку, оскільки зміна запиленості відбувається відносно повільно.

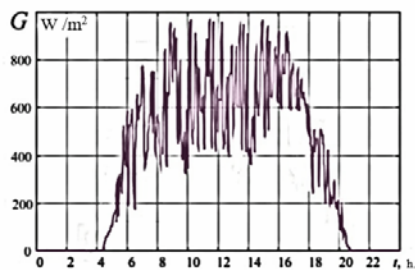


Рисунок 5. Графік добової зміни величини сумарної сонячної радіації

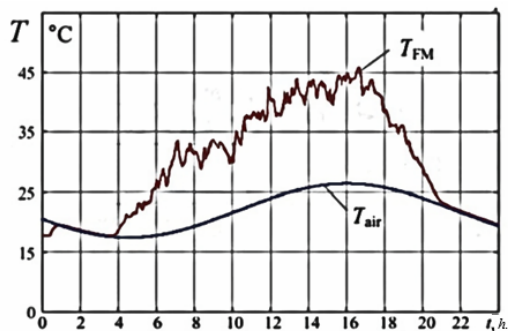


Рисунок 6. Графік нагрівання поверхні ФЕМ

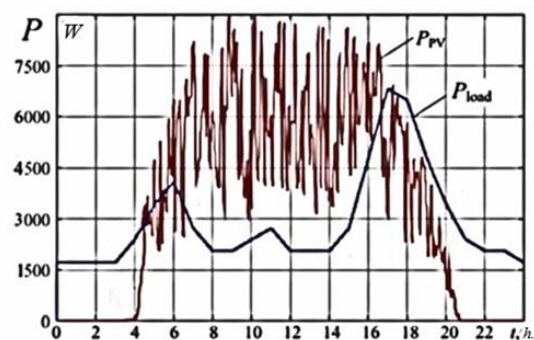


Рисунок 7. Графік створення активної енергії ФЕС

Для кращого розуміння вкладу удосконаленої моделі було проведено моделювання для умов 2020 року та занесено в єдину таблицю два випадки: моделювання без блоку обліку впливу пилу та з ним.

Результат, на перший погляд, не був приголомшливим. У першому випадку було отримано середню генерацію енергії 46,173 кВт*год на день для липня місяця, у другому - 44,17 кВт*год на день. Липень обраний спеціально, оскільки у нас були дані, отримані під час експлуатації СЕС потужністю 9 кВт, в яких

зазначено, що генерація у липні становила 43,91 кВт*год. на день. На основі цього можна стверджувати, що модель сприяє розвитку точності моделювання поведінки фотоелектричних систем в умовах експлуа-

тації. Результати моделювання на 2020 рік наведено на рис. 8.



Рисунок 8. Порівняльний графік двох результатів моделювання

VI. ВИСНОВКИ

В роботі було запропоновано математичну модель імітації роботи СЕС в умовах експлуатації та модернізовано шляхом впровадження блок-моделі обліку впливу запиленості поверхні ФЕМ на її продуктивність для середовища Matlab.

Працездатність цієї моделі була перевірена на прикладі реального об'єкта. Ефективність моделі підтверджується підвищенням точності моделювання на 4,34%.

Отримані при моделюванні дані дозволяють підвищити точність прогнозування генерації електричної енергії з тим, давати рекомендації щодо ефективної експлуатації СЕС і відкриває можливості для розширення моделювання поведінки пилу на поверхні ФЕМ і його впливу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ярмухаметов У. Р., Ахметшин А. Т. Имитационное моделирование режимов работы солнечных установок с фотоэлектрическими преобразователями в зависимости от внутренних и внешних факторов в среде Matlab/Simulink. Вестник КрасГАУ. - 2014. - №8 – С. 195-200
- [2] Иванчура В. И., Краснобаев Ю. В., Пост С. С. Имитационная модель автономной системы электропитания. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies – 2014.
- [3] S. Shevchenko Modernization of a Simulation Model of a Photovoltaic Module, by Accounting for the Effect of Snowing of Photovoltaic Panels on System Performance with Correction for Panel Cleaning for Matlab Simulink / S. Shevchenko, D. Danylchenko, S. Dryvetskiy, A. Potryvai // 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021, pp. 670-675, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570030
- [4] Рубаненко О.О. Визначення генерування ВДЕ з використанням штучних нейронних мереж / Рубаненко О.О., Данильченко Д.О. Тептя В.В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність: зб. наук. пр. - Харків: НТУ «ХПІ», 2020. - № 1 (1) 2020. – С. 70-77.
- [5] Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. 38–51
- [6] Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator //ASHRAE Journal. – 1961. – V. 3. – P. 53–59.
- [7] Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p.
- [8] Tremblay O., Dessaint, L.A., Dekkiche, A.I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. pp. 284–289.
- [9] Alaa Khasawneh Methodology For Accounting For The Influence Of Dust Cover On The Performance Of A Photovoltaic System For Matlab Simulink / Alaa Khasawneh; Mohamed Qawaqzeh; Oleksandr Miroshnyk; Dmytro Danylchenko; Kseniia Minakova; Andrii Potryvai // 2021 IEEE 20th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems

- (MEES), 2021 pp. 1-6, DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598611
- [10] Tremblay O., Dessaint, L.A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. World Electric Vehicle Journal, 2009, vol. 3, pp. 1–10.
- [11] Коломиец Ю.Г., Тарасенко А.Б., Тебуев В.В., Сулейманов М.Ж. Исследование влияния различных видов загрязнений на эффективность эксплуатации солнечных энергоустановок // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(04-06):12-24.
- [12] D. Danylchenko Modeling the influence of dustiness of photovoltaic modules on their performance in Matlab / D. Danylchenko, K. Minakova, A. Potryvai // Energy. Series: “Modern problems of power engineering and ways of sloving them”. - Georgia, Tbilisi. - № 2 (98). – Part 1.- 2021. – С. 126-131.
- [13] Коломиец, Ю.Г. Исследование влияния затенения на эффективность эксплуатации солнечных энергоустановок в условиях плотной городской застройки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 19–21. – С. 16–25.
- [14] Sarver, T. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches [Text] / T. Sarver [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 22. – P. 698–733.
- [15] Goossens, D. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance [Text] / D. Goossens, E. Van Kerschaever // Solar Energy. – 1999. – Vol. 66. – P. 277–289.
- [16] S. Shevchenko Accounting For The Effect Of PV Panel Dustiness On System Performance With Correction For Panel Cleaning For Matlab Simulink / S. Shevchenko, O. Dovgalyuk, D. Danylchenko, O. Rubanenko, S. Fedorchuk A. Potryvai // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021, pp. 373-378, DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575747
- [17] Danylchenko D. Optimization of accumulation units in a mobile, autonomous cottage settlement as a part of maneuvering system / Danylchenko D., Potryvai A. // Energy. Series: “Modern problems of power engineering and ways of sloving them”. - Georgia, Tbilisi. - № 4 (96). – Part 1.- 2020. – С. 120-123.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2021

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА ГЕНЕРАЦИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИЕЙ С ПОМОЩЬЮ MATLAB

- ШЕВЧЕНКО С.Ю. доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедры передачи электрической энергии Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: Sergii.Shevchenko@khpі.edu.ua;
- ДАНИЛЬЧЕНКО Д.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры передачи электрической энергии Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: dmytro.danylchenko@khpі.edu.ua;
- БЕЛИК С.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: Serhii.Bilyk@khpі.edu.ua;
- ПОТРЫВАЙ А.Э. студент, кафедры передачи электрической энергии Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: potryvai.andrew99@gmail.com;
- КОВТУН Г.А. студент, кафедры промышленной и биомедицинской электроники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: georgij.kovtun@gmail.com;

Цель работы. Совершенствование имитационной модели солнечной электростанции посредством создания блок-модели учета запыленности поверхности фотоэлектрических модулей при расчете эффективности генерации электрической энергии солнечной станцией. способы исследования.

Методы исследования. Использование методов статистической обработки данных и моделирование в структуре средств Matlab.

Получены результаты. Создана математическая модель, позволяющая учитывать влияние запыленности поверхности фотоэлектрических модулей на эффективность генерации электрической энергии солнечной станцией. Модель проверена на реальном объекте и доказана точность моделирования.

Научная новизна. Научная новизна заключается в создании математических моделей, описывающих влияние запыленности поверхности фотоэлектрических модулей на эффективность генерации солнечной станции на основе закона Бугера-Ламберта-Бера, разработаны блоки воздействия осадков на пыль и скорректирована скорость накопления пыли путем учета влажности воздуха.

Практическая ценность. Полученные результаты помогут повысить точность моделирования всех типов фотоэлектрических систем. Эти модели могут использоваться как формирование коммерческих предложений с более точными графиками генерации электрической энергии, что может значительно повысить точность выбора установленной мощности оборудования.

Ключевые слова: активная мощность; реактивная мощность; нормальное распределение; эксцесс; асимметрия; математическое ожидание; среднее квадратическое отклонение.

CONSIDERING THE EFFECT OF DUSTINESS OF A PHOTOVOLTAIC MODULE SURFACES ON SOLAR POWER GENERATION BY MATLAB SOFTWARE

- SHEVCHENKO S.Y. Doctor of Science (Engineering), professor, head of department of electric power transmission of National technical university "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: Sergii.Shevchenko@khpi.edu.ua
- DANYLCHENKO D.O. Candidate of Science (Engineering), associate professor, associate professor of electrical power transmission department of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua
- BILYK S.Y. Candidate of Science (Engineering), associate professor of internal combustion engines department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: Serhii.Bilyk@khpi.edu.ua
- POTRYVAI A.E. student, Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: potryvay.andrew99@gmail.com;
- KOVTUN G.A. student, Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: georgij.kovtun@gmail.com

Purpose. Improving the simulation model of a solar power plant by creating a block model for accounting for dustiness of the surface of photovoltaic modules when calculating the efficiency of electric power generation by a solar power plant.

Methodology. Use of statistical data processing methods and modeling in the structure of Matlab tools.

Findings. A mathematical model was created, which made it possible to take into account the influence of dustiness of the surface of photovoltaic modules on the efficiency of electric power generation by a solar power station. The model was tested on the real object and the accuracy of modeling was proved.

Originality. The scientific novelty is to create mathematical models that describe the effect of dust on the surface of photovoltaic modules on the efficiency of solar station generation based on the Bouguer-Lambert-Beer law, the blocks of precipitation influence on dust were developed, and the rate of dust accumulation was corrected by taking into account the air humidity.

Practical value. The obtained results will help to improve the accuracy of modeling of all types of photovoltaic systems. These models can be used as the formation of commercial proposals with more accurate schedules of electric power generation, which can significantly increase the accuracy of the choice of rated capacity of equipment.

Key words: active power; reactive power; normal distribution; kurtosis; asymmetry; mathematical expectation; standard deviation.

REFERENCES

- [1] Yarmukhametov, U. R., Akhmetshin, A. T. (2014) Imitatsionnoye modelirovaniye rezhimov raboty solnechnykh ustanovok s fotoelektricheskimi preobrazovatelyami v zavisimosti ot vnutrennikh i vneshnikh faktorov v srede Matlab/Simulink. *Vestnik KrasGAU*. No 8.
- [2] Ivanchura, V. I., Krasnobayev, YU. V., Post, S. S. (2014) Imitatsionnaya model' avtonomnoy sistemy elektropitaniya. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*.
- [3] Shevchenko, S., Danylchenko, D., Dryvetskiy, S., Potryvai, A. (2021). Modernization of a Simulation Model of a Photovoltaic Module, by Accounting for the Effect of Snowing of Photovoltaic Panels on System Performance with Correction for Panel Cleaning for Matlab Simulink. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 670-675, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570030
- [4] Rubanenko, O.O. Danylchenko, D.O. Teptya, V.V. (2020). Opredeleniye generirovaniya VIE s ispol'zovaniyem iskusstvennykh neyronnykh setey. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KHPI"*. Seriya: Energetika: nadezhnost' i energoefektivnost': sb. nauk. pr. Khar'kov: NTU «KHPI», No 1 (1) 2020, 70-77.
- [5] Obukhov, S.G., Plotnikov, I.A. (2017). Imitatsionnaya model' rezhimov raboty avtonomnoy fotoelektricheskoy stantsii s uchetom real'nykh usloviy ekspluatatsii Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. *Inzhiniring georesursov*. Vol 328, No 6, 38–51
- [6] Liu, B.Y.H., Jordan, R.C. (1961) Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE Journal*. Vol 3, 53–59.
- [7] Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 910.
- [8] Tremblay, O., Dessaint, L.A., Dekkiche, A.I. (2007) A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 284–289.
- [9] Khasawneh, A., Mohamed Qawaqzeh, Miroshnyk, O., Danylchenko, D., Minakova, K., Potryvai, A. (2021) Methodology For Accounting For The Influence Of Dust Cover On The Performance Of A Photovoltaic System For Matlab Simulink. 2021 IEEE 20th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 1-6, DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598611
- [10] Tremblay, O., Dessaint, L.A. (2009) Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 3, 1–10.
- [11] Kolomiyets, YU.G., Tarasenko, A.B., Tebuyev, V.V., Suleymanov, M.ZH. (2018) Issledovaniye vliyaniya razlichnykh vidov zagryazneniy na effektivnost' ekspluatatsii solnechnykh energoustanovok // *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya» (ISJAE)*. 04-06, 12-24.
- [12] Danylchenko, D., Minakova, K., Potryvai, A. (2021) Modeling the influence of dustiness of photovoltaic modules on their performance in Matlab / D. Danylchenko, *Energy. Series: "Modern problems of power engineering and ways of solving them"*. Georgia, Tbilisi, No 2 (98). Vol 1, 126-131.
- [13] Kolomiyets, YU.G. (2017) Issledovaniye vliyaniya zatneneniya na effektivnost' ekspluatatsii solnechnykh energoustanovok v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya» (ISJAE)*. No 19-21, 16-25.
- [14] Sarver, T. A (2013) comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches [Text]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, 698-733.
- [15] Goossens, D., Kerschaefer, E. Van., (1999) Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance [Text]. *Solar Energy*, Vol. 66, 277–289.
- [16] Shevchenko, S. Dovgalyuk, O., Danylchenko, D., Rubanenko, O., Fedorchuk, S. Potryvai, A. (2021) Accounting For The Effect Of PV Panel Dustiness On System Performance With Correction For Panel Cleaning For Matlab Simulink. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 373-378, DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575747
- [17] Danylchenko, D. Potryvai, A. (2020) Optimization of accumulation units in a mobile, autonomous cottage settlement as a part of maneuvering system. *Energy. Series: "Modern problems of power engineering and ways of solving them"*. Georgia, Tbilisi, No 4 (96). Part 1., 120-123.

ВИМІРЮВАННЯ КРУТНОГО МОМЕНТУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕЙ

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

НАЗАРОВА О.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна , e-mail: nazarova16@gmail.com;

ОСАДЧИЙ В.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна , e-mail: w.osadchiy@gmail.com;

Мета роботи. Розробка вузла вимірювання крутного моменту, у складі лабораторного комплексу для дослідження енергетичних характеристик електроприводів з метою математичного моделювання динамічних режимів роботи приводу електричного транспортного засобу.

Методи дослідження. Фізичний експеримент, регресійний аналіз, інтерполяція.

Отримані результати. Розроблено вузол вимірювання крутного моменту у складі лабораторного комплексу дослідження енергетичних характеристик приводів електричних транспортних засобів, конструкція якого дозволяє створювати крутний момент на валу досліджуваного двигуна за допомогою навантажувального і вимірювати його тензометричним датчиком сили. Лабораторний стенд разом із розробленим вузлом вимірювання моменту відповідає необхідному діапазону та точності вимірювань. Отримані на стенді експериментальні дані дозволяють визначити залежність споживаної електроприводом енергії від механічної потужності на валу досліджуваного двигуна, що дає можливість аналітично описати досліджуваний привод і провести математичне моделювання в контексті дослідження впливу механічних параметрів на спожиту енергію в динамічних режимах роботи.

Наукова новизна. Розроблено спосіб вимірювання крутного моменту на валу двигуна для дослідження енергетичних характеристик приводів електричних транспортних засобів. Вказаний спосіб базується на контактному методі вимірювання, який використовує 2 двигуна (навантажувальний і досліджувальний) та тензометричний датчик сили, відрізняється від інших конструкцією, що створює момент на валу досліджуваного двигуна. Результатом обробки експериментальних даних, отриманих даним способом, є аналітична залежність споживаної приводом енергії від значення механічної потужності на валу, параметрами якої є кутова швидкість і крутний момент двигуна. Зазначена енергетична характеристика приводу дозволяє шляхом математичного моделювання визначити електромеханічні параметри приводу, що мінімізують його енергоспоживання у динамічних режимах роботи.

Практична цінність. Запропоновано спосіб вимірювання моменту на валу двигуна, за допомогою якого визначена в аналітичному вигляді залежність енергії, що споживається приводом, від механічної потужності на валу двигуна. Це дозволяє шляхом математичного моделювання знайти електромеханічні параметри системи, що підвищують енергоефективність приводу електричного транспортного засобу.

Ключові слова: електропривод; вимірювання моменту; електромобіль; енергетична характеристика; лабораторний стенд.

I. ВСТУП

Підвищення попиту електричних транспортних засобів сприяє зростанню конкуренції у відповідному сегменті автомобільного ринку.

Актуальними питаннями є підвищення безпеки керування та збільшення запасу ходу електротранспорту. Як і в економічному розвитку, існують 2 шляхи вирішення зазначених проблем: екстенсивний та інтенсивний.

Екстенсивний шлях характеризується, так званим, збільшенням обсягів, масштабів чогось, тобто

кількісне поліпшення. З погляду електротранспорту екстенсивним і методами можна назвати збільшення обсягу батареї, як спосіб підвищити запас ходу або збільшення маси транспортного засобу, з метою добитися стійкого керування, тим самим підвищивши безпеку водіння.

Інтенсивний шлях розвитку – метод якісного вдосконалення. Під цю категорію потрапляють методи, у яких досліджуються особливості об'єктів керування та виходячи з отриманих даних розробляються заходи щодо поліпшення досліджуваних параметрів/критеріїв.

У цій роботі пропонується інтенсивний шлях розвитку технологій електротранспорту, а саме дослідження енергетичних характеристик приводів електромобілів, шляхом експериментального визначення функції приводу, що відображає залежність споживаного приводом струму від значення актуальної механічної потужності на валу двигуна.

Відомо, що в динаміці ефективність перетворення електричної енергії на механічну різна через перерозподіл електричних та електромагнітних втрат при зміні частоти обертання ротора [1]. З метою дослідження енергоефективності приводу в динамічних режимах роботи розроблено лабораторний стенд з вузлом вимірювання та створення моменту навантаження на валу досліджуваного двигуна, що дозволяє експериментальним шляхом визначити аналітичну характеристику приводу (системи ПЧ – Д), в досліджуваному діапазоні роботи двигуна.

Отримана характеристика дозволить провести математичне моделювання динамічних режимів роботи електричного транспортного засобу [2], [3] та здійснити пошук коефіцієнтів редукторів та потужностей двигунів, що забезпечують при розгоні від 0 до 100 км/год мінімальне споживання енергії, що визначає актуальність поставленого завдання.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Враховуючи стрімкий розвиток технологій на даний момент існує безліч різних способів вимірювання крутного моменту на валу двигуна, незважаючи на складність такого роду вимірювання. Здебільшого, рішення полягають у створенні виробниками спеціалізованих датчиків, що відрізняються високою вартістю на ринку та складним принципом роботи. У той же час при обранні датчиків доводиться шукати компроміс між необхідним діапазоном вимірювання та чутливістю через зменшення діапазону зі збільшенням чутливості і навпаки [4]. Багато розробок призначені для вузької спеціалізації, так у роботах [5]-[8] розроблені датчики для медичних цілей в джерелі [9] розроблений датчик з 6-ма ступенями свободи, для мікроманіпуляцій та визначення сили у хірургічних швах. У роботі [10] автори використовують оптичні прилади для вимірювання моменту на валу, уникаючи механічного втручання. Немалу кількість різноманітних варіацій конструкцій датчиків демонструє роботехнічна галузь. Автори робіт [11]-[12] застосували ідею платформи Г'ю-Стюарта та розробили багатоосовий датчик. У роботах [13]-[14] розроблений датчик застосовано до гідравличного чотириного роботу. Також існують датчики низької вартості, на думку авторів [15], розроблених для станку з числовим програмним забезпеченням. Роботи [16]-[17] описує переваги безконтактних методів вимірювання крутного моменту та їх зразки.

З огляду на характерну вузьку спрямованість при розробці методу вимірювання моменту або вибору відповідного датчика, актуальним є розробка методу вимірювання моменту з точки зору дослідження енергетичної характеристики приводу.

Що стосується розгляду приводу з погляду витрат енергії, з проведеного аналізу можна дійти висновку, що досліди мають галузеву специфіку і розглядаються у межах області застосування та рідко афішуються. Що стосується автомобільної галузі, подібні дослідження відображаються в [18], що описують, характеристики приводів вже серійних транспортних засобів.

III. МЕТА РОБОТИ

Розробити вузол вимірювання моменту у складі лабораторного стенду дослідження енергетичних характеристик приводів.

На базі розробленого стенду, експериментальним шляхом визначити функцію приводу ЕТС, що відображає залежність енергії, що витрачається, на одиницю механічної потужності, з метою визначення значення коефіцієнта редуктора, що забезпечує мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год, шляхом математичного моделювання.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Об'єкт дослідження – електропривод 4-х приводного електромобіля, структура якого представлена на рисунку 1.

Основні елементи – батарея як джерело електричної енергії; електропривод, що складається з: системи ПЧ – Д, редуктор – як перетворювач електричної енергії в механічну та колесо як виконавчий орган.

Запропоноване рішення підвищення енергоефективності приводу, полягає у визначенні функції приводу, яка як частина математичної моделі, дозволить визначити споживання енергії при розгоні транспортного засобу від 0 – 100 км/год. Аналітичний вид цієї функції представлений (1)

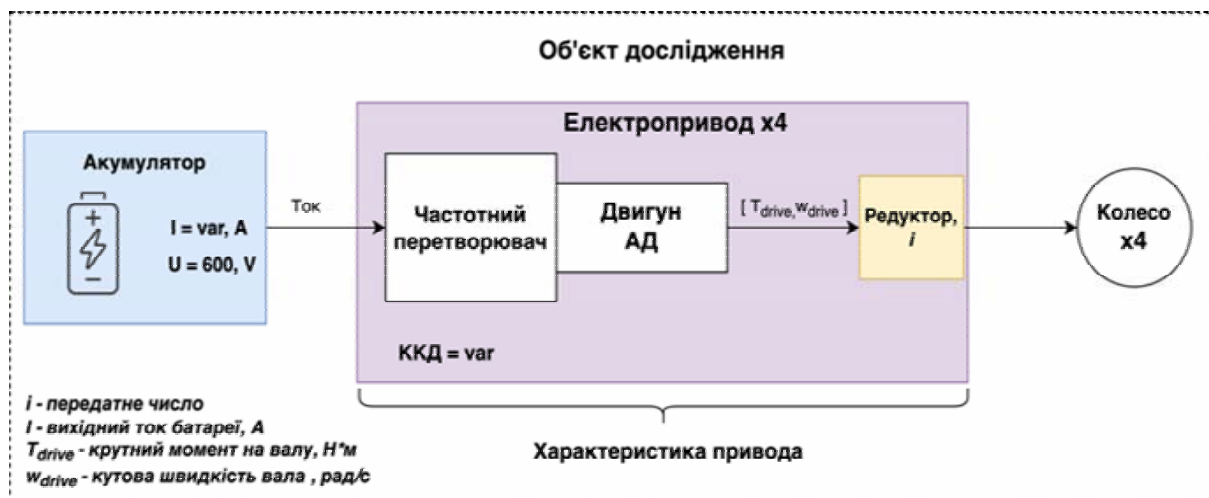
$$I = f(T_{drive}, \omega_{drive}), \quad (1)$$

де I - значення споживаного струму приводом, А;

T_{drive} - значення моменту на валу досліджуваного двигуна Н·м;

ω_{drive} - значення кутової швидкості валу досліджуваного двигуна рад/с.

Далі за допомогою математичного моделювання буде побудовано залежність споживаної електричної енергії від коефіцієнтів редукторів та визначено мінімум зазначеної залежності. Структура описаного рішення представлена на рисунку 2.



Предмет дослідження:
 Енергоефективність привода електромобіля при розгоні від 0-100км/год за 5 секунд

Рисунок 1. Структурна схема об'єкта дослідження

Предмет дослідження:
 Енергоефективність привода електромобіля при розгоні від 0-100км/год за 5 секунд

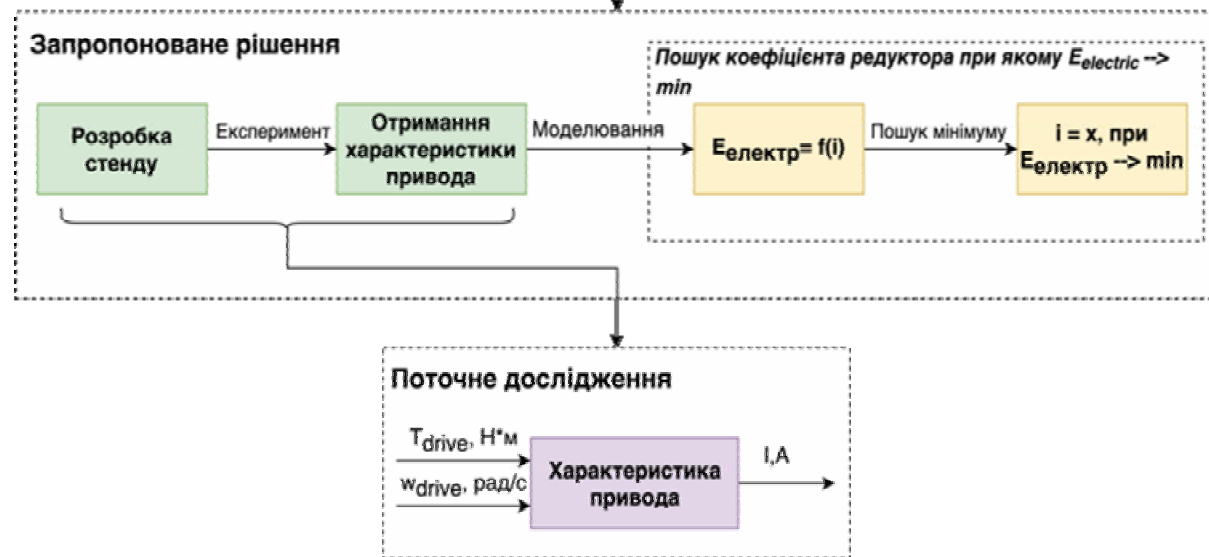


Рисунок 2. Структурна схема запропонованого рішення щодо підвищення енергоефективності привода ЕТС

З метою визначення шуканої функції розроблено лабораторний стенд, структура якого представлена на рисунку 3

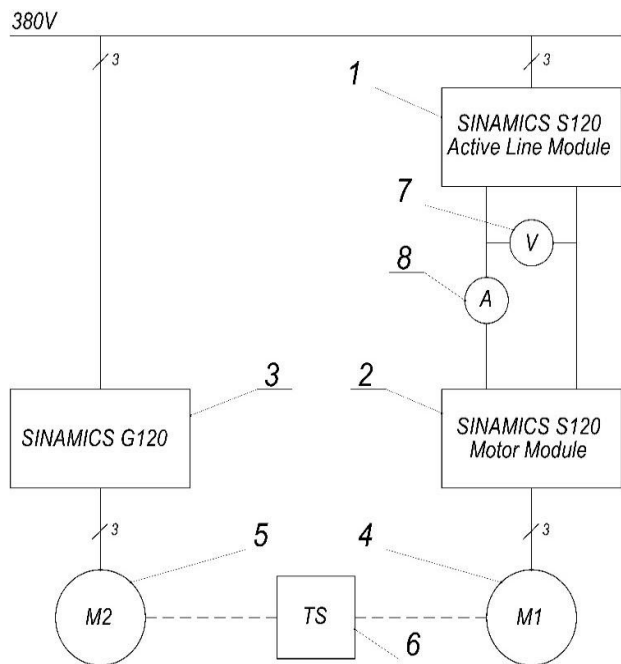


Рисунок 3. Структура лабораторного стенду дослідження енергетичних характеристик приводу

Основне завдання розробленого стенда – експериментальним шляхом, в досліджуваних діапазонах вимірювань, визначити залежність споживаного струму від крутного моменту і частоти обертання валу двигуна.

Розроблений стенд складається із трьох підсистем: управління (1, 2, 3); вимірювання (6, 7, 8); механічна (4, 5).

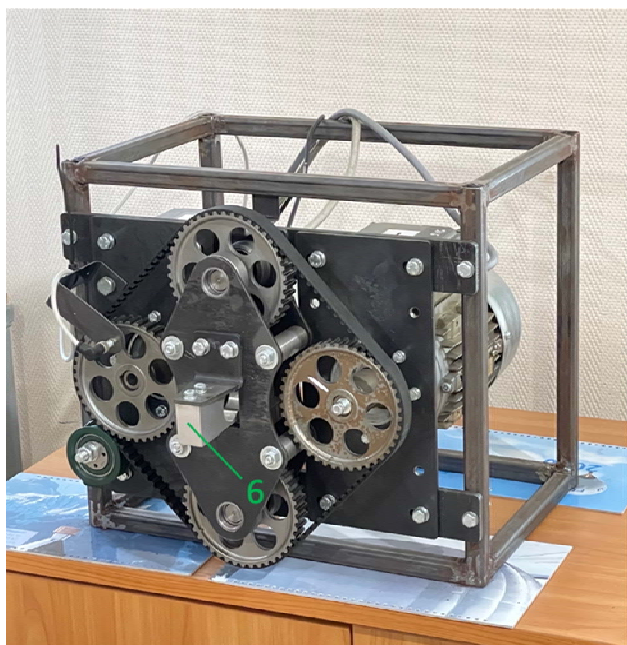


Рисунок 4. Фото механічної підсистеми із вузлом вимірювання моменту

Механічна підсистема, за допомогою розробленої конструкції, згідно з існуючими способами вимірювання моменту, [19] реалізує функцію створення навантажувальним двигуном (5) моменту опору на валу досліджуваного двигуна (4) через вузол вимірювання моменту (6), що включає два зубчасті колеса, осі яких жорстко пов'язані між собою і через тензометричний датчик кріпляться до основи. Тип досліджуваного та навантажувального двигуна - TS8034 B14, 1,1 кВт. На рисунку 4 представлено фото механічної підсистеми.

Регулювання моменту опору на валу досліджуваного двигуна забезпечується підсистемою керування. За допомогою органів керування змінюється значення заданих частот обертання, які подаються на регулятори швидкості частотних перетворювачів фірми Siemens навантажувального та досліджуваного приводів. Управління навантажувальним двигуном здійснюється ПЧ SINAMICS G120 (3), а досліджуваним – SINAMICS S 120 (1, 2).

Вимірювальна підсистема фіксує показання приладів, що визначають споживану електричну енергію та механічну потужність на валу двигуна. Елементи 7 і 8 відповідають за вимірювання напруги та струму в колі постійного струму ПЧ досліджуваного двигуна відповідно. Це дає інформацію про споживану електричну енергію.

Дані про частоту обертання валу двигуна реєструються за допомогою програмного забезпечення фірми Siemens STARTER, що дозволяє режимі реального часу стежити за параметрами системи керування.

Інформація про момент на валу досліджуваного двигуна формується на підставі даних тензометричного датчика сили (6), що є частиною конструкції механічної підсистеми, яка вимірює зусилля на валу досліджуваного двигуна. Сигнали з датчика обробляються за допомогою PLC S 7-300 модулем SIWAREX U.

Розузгодження частот обертання магнітних полів статорів навантажувального та досліджуваного приводу при однаковій швидкості обертання роторів обох двигунів формує базовий принцип, що лежить в основі створення моменту на досліджуваному приводі.

Розглянемо докладніше методику вимірювання моменту на валу досліджуваного двигуна. Механічна частина стенду сконструйована таким чином, що при виникненні моменту опору на валу, в наслідок неузгодженості частот обертання магнітних полів статорів навантажувального та досліджуваного двигуна, відбувається перерозподіл сил натягу ремня ($F_1 - F_8$) і результуючі сили (F_{12}, F_{36}), які показано на рисунку 5.

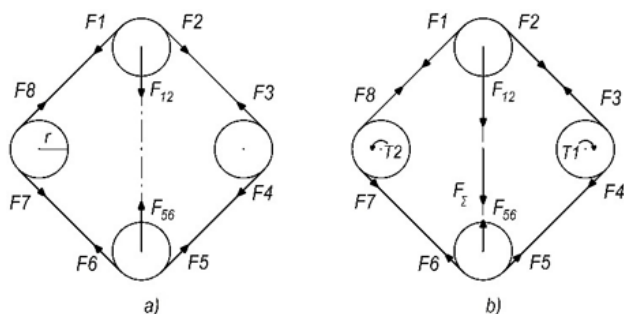


Рисунок 5. Схема розподілу сил датчика моменту

Сили F_1-F_8 і $F_{12} F_{56}$ скомпенсовані за відсутності моменту опору (рисунок 5 а). У разі моменту опору на навантажувальному двигуні T_2 (малюнок 5 б) виникає перерозподіл сил натягу ремня, у якому $F_1 = F_2 = F_3 = F_8$ і $F_4 = F_5 = F_6 = F_7$. Аналітичні вирази, що описують результуючі сили $F_{12} F_{56}$ і F_{Σ} представлені (2-4) відповідно.

$$F_{12} = F_3 \cdot \sqrt{2}, \quad (2)$$

$$F_{56} = F_4 \cdot \sqrt{2}, \quad (3)$$

$$F_{\Sigma} = F_{12} - F_{56} = (F_3 - F_4) \cdot \sqrt{2}. \quad (4)$$

Виходячи з балансу моментів (5) і розподілу сил (2-4) слідує (6), залежність результуючого моменту навантаження T_1 від сумарної сили F_{Σ} , що визначається тензометричним датчиком сили (TS)

$$F_3 \cdot r - F_4 \cdot r - T_1 = 0, \quad (5)$$

$$T_1 = \frac{F_{\Sigma} \cdot r}{\sqrt{2}}. \quad (6)$$

При аналізі показань тензометричного датчика використовується отримана дослідним шляхом регресійна функція (7), що описує поведінку датчика сили на досліджуваному діапазоні вимірювань.

$$F_{\Sigma} = a \cdot X + b, \quad (7)$$

де $a - 3,35 \cdot 10^{-4}$

$b - (-4,36)$

X – дані з датчика, од. АЦП

На рисунку 6 представлена характеристика датчика у графічному вигляді.

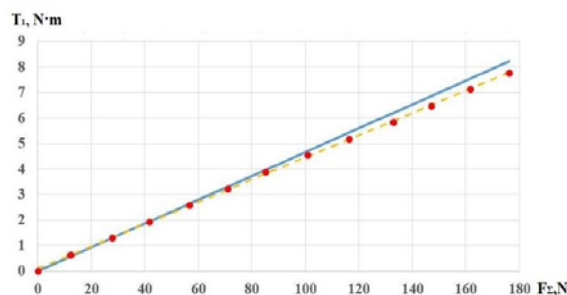


Рисунок 6. Характеристика тензометричного датчика сили

У ході експерименту спочатку проходив синхронний розгін досліджуваного та навантажувального приводів, потім за допомогою зменшення значення заданої швидкості обертання навантажувального двигуна створювався момент опору для приводу, що досліджується.

Таблиця 1. Експериментальні дані споживання приводом струму для швидкості 1000 об/хв

U, В	M, Н·м	I, А	Pel, Вт	Pmech, Вт	η, %
600	1	0,56	336,67	104,67	31
600	1,5	0,65	389,54	157	40
600	2	0,74	442,41	209,33	47
600	2,5	0,85	507,51	261,67	52
600	3	0,96	574,66	314,00	55
600	3,5	1,07	643,15	366,33	57
600	4	1,19	712,43	418,67	59
600	4,5	1,31	784,21	471	60
600	5	1,43	858,92	523,33	61
600	5,5	1,56	935,82	575,67	62
600	6	1,69	1015,39	628	62
600	6,5	1,82	1094,65	680,33	62
600	7	1,96	1173,66	732,67	62
600	7,5	2,10	1257,86	785,00	62
600	8	2,24	1344,65	837,33	62
600	8,5	2,39	1436,17	889,67	62
600	9	2,54	1526,79	942,00	62
600	9,5	2,69	1614,67	994,33	62
600	10	2,84	1706,95	1046,67	61
600	10,5	3,00	1802,44	1099,00	61
600	11	3,18	1908,43	1151,33	60

При цьому фіксуються показання амперметра та тензометричного датчика сили. Зазначені дії виконували для синхронних частот обертання від 500 до 2250 об/хв з кроком 250 об/хв. Отримані експериментальні дані представлені у таблиці 1.

На підставі даних побудовано сімейство кривих для різних частот обертання, що відображають залежність ККД від крутного моменту (рисунок 7) і сімейство кривих для різних моментів, що відображають залежність ККД від частоти обертання (рисунок 8).

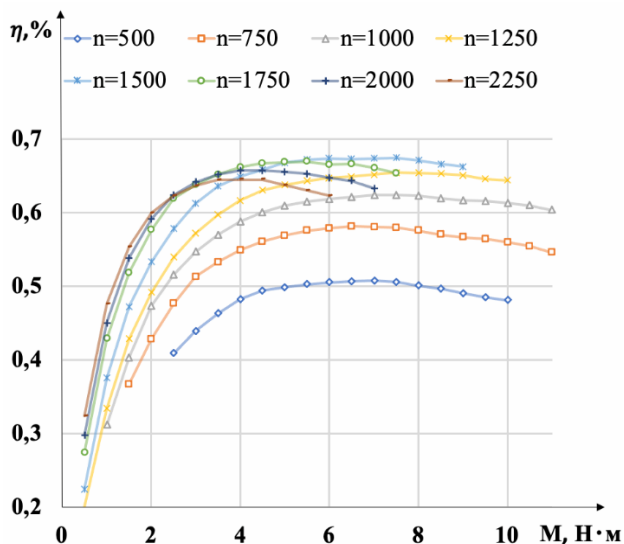


Рисунок 7. Сімейство кривих для частоти обертання досліджуваного двигуна (500 – 2250 об/хв)

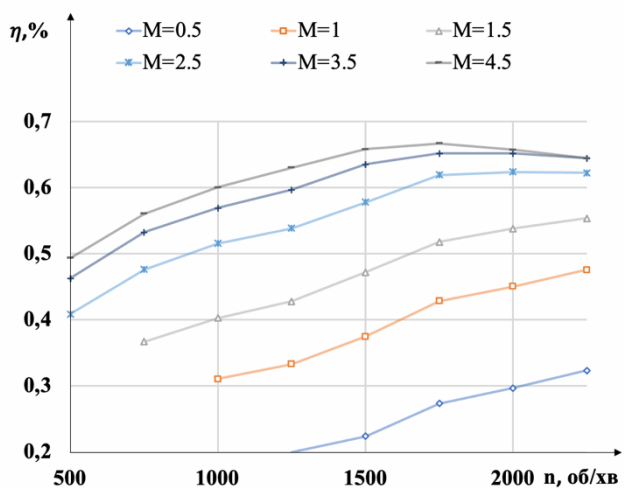


Рисунок 8. Сімейство кривих для моментів досліджуваного двигуна (0,5-4,5 Н·м)

V. ВИСНОВКИ

Розроблений стенд, що має вузол вимірювання крутного моменту на валу досліджуваного двигуна, дозволяє визначити характеристику електроприводу у

виді з залежності споживання електричної енергії від моменту і частоти обертання ротора двигуна.

Зазначені залежності враховують варіативність ККД двигуна в динамічних режимах роботи математичної моделі електричного частотно-керованого приводу.

Подальші дослідження будуть продовжені у напрямку пошуку за допомогою математичного моделювання значень потужностей двигунів та передавальних чисел редукторів, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за заданий час.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Osadchyy, V.V. Laboratory Stand for Research of Energy Characteristics of Electric Vehicle Drives / O.S. Nazarova, V.V. Osadchyy, V.V. Brylysty / 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021. – pp. 1-4. doi: 10.1109 / MEES52427.2021.9598661
- [2] Nazarova, O.S. Computer simulation of electric vehicle acceleration processes with different positions of the mass center / O.S. Nazarova, V.V. Osadchyy, V.V. Brylysty // Applied Aspects of Information Technology, 2020. - Vol.3. - No.3. - P. 154–164. DOI: 10.15276/aait.01.2020.4
- [3] Осадчий, В.В. Структура системы управления 4-х приводной силовой установки для электрических транспортных средств / В.В. Осадчий, Е.С. Назарова, В.В. Брылстый // Проблемы региональной энергетики (специальный выпуск), 2019. – № 1-2(41) 2019. – С. 65-73. DOI: 10.5281/zenodo.3239150
- [4] Suh, J. Development and Application of Motor-Equipped Reaction Torque Sensor with Adjustable Measurement Range and Sensitivity / J. Suh, J. Lee, D.-E. Lee // Appl. Sci., 2020. –Vol. 10 (24). – P. 8770. DOI: 10.3390/app10248770
- [5] Joubair, A. Use of a Force-Torque Sensor for Self-Calibration of a 6-DOF Medical Robot / A. Joubair, L.F. Zhao, P. Bigras, I.A. Bonev // Sensors, 2016. – Vol. 16. – P. 798. DOI: 10.3390/s16060798.
- [6] Hashimdeen, S.H. The Design and Construction of an Electrohydrodynamic Cartesian Robot for the Preparation of Tissue Engineering Constructs / S.H. Hashimdeen, M. Miodownik, M.J. Edirisinghe // PLoS ONE, 2014. – Vol. 9(11): e112166. DOI: 10.1371/journal.pone.0112166
- [7] Schwalb, W. A force-sensing surgical tool with a proximally located force/torque sensor / W. Schwalb, B. Shirinzadeh, J. Smith // Int. J. Med Robot. Comput. Assist. Surg. 2017. – Vol. 13, e1737. DOI: 10.1002/rcs.1737.
- [8] Horeman, T. Force sensing in surgical sutures / T. Horeman, E.J.Meijer, J.J. Harlaar, J.F. Lange, J.J. van

- den Dobbelssteen, J. Dankelman // PLoS ONE 2013. – Vol. 8, e84466.
- [9] Estevez, P. 6 DOF force and torque sensor for micro-manipulation applications / P. Estevez, J.M. Bank, M. Porta, J. Wei, P.M. Sarro, M. Tichem, U. Staufer // Sens. Actuators A Phys., 2012. – Vol. 186. – pp. 86-93. DOI: 10.1016/j.sna.2012.02.037
- [10] Zappalá, D. Non-intrusive torque measurement for rotating shafts using optical sensing of zebra-tapes / D. Zappalá, M. Bezziccheri, C. J. Crabtree, N. Paone // Measurement Science and Technology, 2018. – Vol. 29. – Num. 6. Sci. Technol. 29 065207. DOI: 10.1088/1361-6501/aab74a
- [11] Kerr, D.R. Analysis, properties, and design of a Stewart-platform transducer / D.R. Kerr // ASME J. Mech. Transm. Autom. Des., 1989. – Vol. 111. – pp. 25–28.
- [12] Dwarakanath, T.A. Design and development of a Stewart platform based force–torque sensor / T.A. Dwarakanath, B. Dasgupta, T.S. Mruthyunjaya, // Mechatronics, 2001. Vol. 11. pp. 793–809.
- [13] Khan, H. An innovative torque sensor design for the lightest hydraulic quadruped robot / H. Khan, F. Cannella, D.G. Caldwell, C. Semini // Assistive Robotics: Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR; World Scientific: Singapore, 2015.
- [14] Khan, H. Towards Scalable Strain Gauge-Based Joint Torque Sensors / H. Khan, M. Imperio, F. Cannella, D.G. Caldwell, A. Cuschieri, C. Semini, // Sensors, 2017. – Vol. 17. – 1905. DOI: 10.3390/s17081905
- [15] Ubeda, R.P. Design and manufacturing of an ultra-low-cost custom torque sensor for robotics / R.P. Ubeda, S.C. Gutiérrez Rubert, R. Zotovic Stanisic, Á. Perles Ivars // Sensors 2018. – Vol. 18, 1786.
- [16] Ul Islam, M. N. Method of torque measurement based on volumetric strain / M. N. Ul Islam, P. Cheng, B. Oelmann // 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2016. – pp. 116-123. DOI: 10.1109/SICE.2016.7749205.
- [17] Толмачов, С.Т. Система безконтактного виміру моменту на валу електродвигунів в умовах експлуатації / С.Т. Толмачов, І.М. Бурчак // Вісник Криворізького національного університету, 2017. - Вип. 44. – С. 131-137.
- [18] Назарова, Е. С. Исследование энергетических характеристик электроприводов электрических транспортных средств / Е. С. Назарова, В. В. Осадчий, В. В. Брылистый // Энергия – Тбилиси, 2021. - № 2(98). – С. 19-23.
- [19] ДСТУ ІЕС 60034-2-1:2019. Машини електричні обертові. Частина 2-1. Стандартні методи визначення втрат та коефіцієнта корисної дії під час випробувань (за винятком машин для тягових транспортних засобів). Чинний з 2019-08-01. – ІЕС 60034-2-1:2014, IDT

Стаття надійшла до редакції 10.11.2021

ИЗМЕРЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

- БРЫЛИСТЫЙ В.В.** аспирант кафедри електропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: 77vitya77@gmail.com ;
- НАЗАРОВА Е.С.** канд. техн. наук, доцент, кафедри електропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: nazarova16@gmail.com;
- ОСАДЧИЙ В.В.** канд. техн. наук, доцент, кафедри електропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: w.osadchiy@gmail.com ;

Цель работы. Разработка узла измерения крутящего момента в составе лабораторного комплекса для исследования энергетических характеристик электроприводов с целью математического моделирования динамических режимов работ привода электрического транспортного средства.

Методы исследования. Физический эксперимент, регрессионный анализ, интерполяция.

Полученные результаты. Разработан узел измерения крутящего момента в составе лабораторного комплекса исследования энергетических характеристик приводов электрических транспортных средств, конструкция которого позволяет создавать крутящий момент на валу исследуемого двигателя с помощью нагрузочного и измерять его тензометрическим датчиком силы. Лабораторный стенд совместно с разработанным узлом измерения момента соответствует требуемому диапазону и точности измерений. Полученные на стенде экспериментальные данные позволяют определить зависимость потребляемой приводом энергии от механической мощности на валу исследуемого двигателя, что дает возможность

аналитически описать исследуемый привод и провести математическое моделирование в контексте исследования влияния механических параметров на потребленную энергию в динамических режимах работы.

Научная новизна Разработан способ измерения крутящего момента на валу двигателя для исследования энергетических характеристик приводов электрических транспортных средств. Указанный способ базируется на контактном методе измерения, который использует 2 двигателя (нагрузочный и исследуемый) и тензометрический датчик силы и отличается от других конструкцией, что создает момент на валу исследуемого двигателя. Результатом обработки экспериментальных данных, полученных данным способом, является аналитическая зависимость потребляемой приводом энергии от значения механической мощности на валу, параметрами которой являются угловая скорость и крутящий момент двигателя. Указанная энергетическая характеристика привода позволяет путем математического моделирования определить электромеханические параметры привода, минимизирующие его энергопотребление в динамических режимах работы.

Практическая ценность. Предложен способ измерения момента на валу двигателя, с помощью которого определена в аналитическом виде зависимость потребляемой приводом энергии от механической мощности на валу двигателя, что позволяет путем математического моделирования найти электромеханические параметры системы, повышающие энергоэффективность привода электрического транспортного средства.

Ключевые слова: электропривод; измерение момента; электромобиль; энергетическая характеристика; лабораторный стенд.

TORQUE MEASUREMENT FOR RESEARCHING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF ELECTRIC VEHICLE DRIVES

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

NAZAROVA O.S. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nazarova16@gmail.com;

OSADCHYY V.V. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: w.osadchiy@gmail.com.

Purpose. Development of a torque measuring unit as part of a laboratory complex for studying the energy characteristics of electric drives for the purpose of mathematical modeling of the dynamic operating modes of an electric vehicle drive.

Research methods. Physical experiment, regression analysis, interpolation.

Findings. A torque measuring unit has been developed as part of a laboratory complex for studying the energy characteristics of electric vehicle drives, the design of which allows creating a torque on the shaft of the engine under study using a load and measuring it with a strain gauge force sensor. The laboratory stand together with the developed torque measuring unit corresponds to the required range and measurement accuracy. The experimental data obtained at the test bench make it possible to determine the dependence of the energy consumed by the drive on the mechanical power on the shaft of the engine under study, which makes it possible to analytically describe the drive under study and carry out mathematical modeling in the context of studying the influence of mechanical parameters on the consumed energy in dynamic modes of operation.

Originality. A method for measuring torque on the motor shaft for studying the energy characteristics of electric vehicle drives has been developed. This method is based on the contact method of measurement, which uses 2 motors (loading and testing) and strain gauge force sensor and differs from others in the design that creates a moment on the shaft of the test motor. The result of processing the experimental data obtained by this method is the analytical dependence of the energy consumed by the drive on the value of the mechanical power on the shaft, the parameters of which are the angular speed and torque of the engine. The specified energy characteristic of the drive makes it possible, by means of mathematical modeling, to determine the electromechanical parameters of the drive, minimizing its energy consumption in dynamic modes of operation.

Practical value. A method for measuring the moment on the motor shaft is proposed, with the help of which the dependence of the energy consumed by the drive on the mechanical power on the motor shaft is determined in an analytical form, which allows by mathematical modeling to find the electromechanical parameters of the system that increase the energy efficiency of the drive of an electric vehicle.

Keywords: electric drive; torque measurement; electric car; energy characteristic; laboratory stand.

REFERENCES

- [1] Osadchyy, V.V., Nazarova, O.S., Brylysty, V.V. (2021). Laboratory Stand for Research of Energy Characteristics of Electric Vehicle Drives. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021, pp. 1-4. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598661
- [2] Nazarova, O.S., Osadchyy, V.V., Brylysty, V.V. (2020). Computer simulation of electric vehicle acceleration processes with different positions of the mass center. Applied Aspects of Information Technology, 2020, Vol.3., No.3, pp. 154–164. DOI: 10.15276/aait.01.2020.4
- [3] Osadchyy, V.V., Nazarova, O.S., Brylysty, V.V. (2019). Struktura sistemy upravleniya 4-kh privodnoy silovoy ustanovki dlya elektricheskikh transportnykh sredstv [The structure of the control system of a 4-drive power plant for electric vehicles]. Problemele Energeticii Regionale, vol. 1-2 (41), pp. 65-73. DOI: 10.5281/zenodo.3239150 (in Russian)
- [4] Suh, J., Lee, J., Lee, D.-E. (2020). Development and Application of Motor-Equipped Reaction Torque Sensor with Adjustable Measurement Range and Sensitivity. Appl. Sci. 2020, 10, 8770. DOI: 10.3390/app10248770
- [5] Joubair, A., Zhao, L.F., Bigras, P., Bonev, I.A. (2016) Use of a Force-Torque Sensor for Self-Calibration of a 6-DOF Medical Robot. Sensors 2016, 16, 798. DOI: 10.3390/s16060798.
- [6] Hashimdeen, S.H., Miodownik M., Edirisinghe M.J. (2014). The Design and Construction of an Electrohydrodynamic Cartesian Robot for the Preparation of Tissue Engineering Constructs. PLoS ONE, vol. 9(11), e112166. DOI: 10.1371/journal.pone.0112166
- [7] Schwalb, W., Shirinzadeh, B., Smith, J. (2017). A force-sensing surgical tool with a proximally located force/torque sensor. Int. J. Med Robot. Comput. Assist. Surg. 2017, 13, e1737. DOI: 10.1002/rcs.1737.
- [8] Horeman, T., Meijer, E.J., Harlaar, J.J., Lange, J.F. van den Dobbelen, J.J., Dankelman, J. (2013). Force sensing in surgical sutures. PLoS ONE 2013, 8, e84466.
- [9] Estevez, P., Bank, J.M., Porta, M., Wei, J., Sarro, P.M. Tichem M., Staufer U. (2012). 6 DOF сили і torque sensor для micro-manipulation applications. Sens. Actuators A Phys. 2012, 186, 86-93. DOI: 10.1016/j.sna.2012.02.037
- [10] Zappalá, D., Bezziccheri, M., Crabtree, C. J., Paone, N. (2018). Non-intrusive torque measurement for rotating shafts using optical sensing of zebra-tapes. Measurement Science and Technology, Vol. 29, Number 6. Sci. Technol. 29 065207. DOI: 10.1088/1361-6501/aab74a
- [11] Kerr, D.R. (1989). Analysis, properties, and design of a Stewart-platform transducer. ASME J. Mech. Transm. Autom. Des. 1989, 111, 25–28.
- [12] Dwarakanath, T.A., Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (2001). Design and development of a Stewart platform based force–torque sensor. Mechatronics 2001, 11, 793–809.
- [13] Khan, H., Cannella, F., Caldwell, D.G., Semini, C. (2015). An innovative torque sensor design for the lightest hydraulic quadruped robot. In Assistive Robotics: Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR; World Scientific: Singapore, 2015
- [14] Khan, H., D’Imperio, M., Cannella, F., Caldwell, D.G., Cuschieri, A., Semini, C. Towards Scalable Strain Gauge-Based Joint Torque Sensors. Sensors 2017, 17, 1905. DOI: 10.3390/s17081905
- [15] Ubeda, R.P., Gutiérrez Rubert, S.C., Zotovic Stanisic, R., Perles Ivars, Á. (2018). Design and manufacturing of an ultra-low-cost custom torque sensor for robotics. Sensors 2018, 18, 1786.
- [16] Ul Islam, M. N., Cheng P., Oelmann B. (2016). Method of torque measurement based on volumetric strain. 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2016, pp. 116-123, DOI: 10.1109/SICE.2016.7749205.
- [17] Tolmachov, S.T. Burchak, I.M. (2017). Sistema bezkontaktnogo vymiru momentu na valu elektrodviguniv v umovah ekspluatacii [Contactless moment measurement system on the shaft of electric motors in operating conditions]. Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu, vyp. 44, 2017.
- [18] Nazarova, E. S., Osadchyy, V.V., Brylysty, V.V. (2021). Issledovaniye energeticheskikh kharakteristik elektroprivodov elektricheskikh transportnykh sredstv [Research of energy characteristics of electric drives of electric vehicles]. Energy - Tbilisi, 2021, 2 (98), pp. 19-23. (in Russian)
- [19] DSTU IEC 60034-2-1:2019. Mashyny elektrychni obertovi. Chastyna 2-1. Standartni metody vyznachennja vtrat ta koeficijenta korysnoi' dii' pid chas vyprobuvan' (za vynjatkom mashyn dlja tjavovyh transportnyh zasobiv). [Standard methods for determining losses and efficiency during tests (excluding traction vehicles)]. Chynnyj z 2019-08-01. – IEC 60034-2-1:2014, IDT