



Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№3'2020

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

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2020

Головний редактор д-р техн. наук
Яримбаш Д.С.

Заст. гол. редактора д-р техн. наук
Тіховод С.М.

Відповідальний канд. техн. наук
секретар Коцур М. І.

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ
КОЛЕГІЇ

Yunus Biçen, Ph.D, університет Дюздже,
Туреччина;

Zgraja Jerzy, Ph.D, професор Лодзького тех-
нологічного 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, Кардіфф,
Великобританія;

Sebastian Tomy, Ph.D, професор університету
Торонто, м. Торонто, Канада, технічний ек-
сперт корпорації "Motor Drives and Control
Group", Бей-Сіті, Мічиган, США;

Arturi, Cesare Mario, Ph.D., професор політе-
хнічного університету Мілана, Італія;

Ronseero-Clemente Carlos, Ph.D., професор
факультету Електроенергетика та електронні
системи, Університет Естремадури, м. Бада-
хос, Іспанія;

José Roberto Camacho, PhD, професор
електротехніки в Uberlandia федеральний
університет, Бразилія;

Mohamed Ahmed Moustafa Hassan, Ph.D.,
професор кафедри електротехніки та електро-
енергетики, Каїрський університет, Гіза, Єги-
пет.

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 універ-
ситет 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 універси-
тету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна; **Па-
ранчук Я. С.**, д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львів-
ська 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 «Запо-
різька 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 по-
літехніка», 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 націо-
нальний університет, м. Хмельницький, Україна; **Кочан В. В.**, канд.
техн. наук, доц., Тернопільський національний економічний універси-
тет, м. Тернопіль, Україна; **Глоба Л. С.**, д-р. техн. наук, проф., Націо-
нальний 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.

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 Recourse 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 резуль-
тати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук у галузі елек-
тротехніки та електроенергетики у відповідності з рубриками: 1. Електротехніка; 2. Електроенергетика.

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

Видавець: Національний університет "Запорізька політехніка", м. Запоріжжя. Свідчення суб'єкта видавничої справи
ДК №6952 від 22.10.2019р.

Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідчення про державну реєстрацію КВ №24219-
14059 ПР від 07.11.2019р.

Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ, національний університет "Запорізька політехніка", вул. Жуковського,
64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон: +380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rrvv@zntu.edu.ua.
Електронна адреса журналу <http://ee.zntu.edu.ua> E-mail: etae@ukr.net

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 08.10.2020 за рекомендаці-
єю вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №2/20 від 28.09.2020 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк.
4,19. Тираж 300 прим. Зам. №1073



Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№3'2020

Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2020

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, Ph.D., Prof., Polytechnic University of Milan, Italy;
Carlos Roncero-Clemente, Ph.D., Prof., Universidad de Extremadura, Badajoz, Spain;
José Roberto Camacho PhD, Prof., Universidade Federal de Uberlândia, Brazil;
Mohamed Ahmed Moustafa Hassan, Ph.D., Prof., Cairo University, Giza, Egypt.

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

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

The scientific journal publishes the results of fundamental and applied research, in particular the results of dissertation papers for obtaining the scientific degrees of a Sc.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.

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 October 08, 2020 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No. 2/20 dated september 28, 2020). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 4,19. Number of copies printed 300. Rep. №1073

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Грохольський Я.М., Сусь Б.А.

Розвиток уявлень про «струм зміщення».....8

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Хребтова О.А., Зачена Н.В.

Теплові режими автоматизованої системи електропривода під час рушання під навантаженням14

III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Кулинич Е.М., Назарова О.С., Гончаров Д.В., Чернишев С.Г., Піскун В.В.

Лабораторний стенд з бездротовим інтерфейсом для дослідження систем автоматичного керування електроприводами постійного струму.....24

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

Hrokholskyi J. M., Sus B. A.

Development of ideas about "bias current"8

II POWER ENGINEERING

Khrebtova O.A., Zachepa N.V.

Thermal modes of the automated electric drive system during burning under load.....14

III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Kulynych E.M., Nazarova O.S., Goncharov D.V., Chernyshev S.G., Piskun V.V.

Laboratory stand with wireless interface for investigation of automatic control systems
of DC electric drives.....24

СОДЕРЖАНИЕ

I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Грохольский Я.М., Сусь Б. А.

Развитие представлений о «токе смещения».....8

II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Хребтова О.А., Зачена Н.В.

Тепловые режимы автоматизированной системы электропривода при трогании под нагрузкой.....14

III АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кулинич Э.М., Назарова Е.С., Гончаров Д.В., Чернишев С.Г., Пискун В.В.

Лабораторный стенд с беспроводным интерфейсом для исследования систем автоматического управления электроприводами постоянного тока.....24

УДК 53.07

РОЗВИТОК УЯВЛЕНЬ ПРО «СТРУМ ЗМІЩЕННЯ»

ГРОХОЛЬСЬКИЙ
Я.М.

Канд. техн. наук, професор кафедри автоматичних систем управління Військового інституту телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв крут, Київ, Україна, e-mail: GGYM@ukr.net;

СУСЬ Б.А.

Д-р пед. наук, професор кафедри математики та фізики Військового інституту телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв крут, Київ, Україна, e-mail: bogdansus@gmail.com.

Мета роботи. В електротехніці, радіотехніці вживаються такі поняття як заряд, електричне поле, магнітне поле, електромагнітне поле, постійний електричний струм, змінний струм. Ці абстрактні поняття відображають певні реальні фізичні явища. Наприклад, струм розуміється як напрямлений рух електричних зарядів. Однак існує також умовно-абстрактне поняття «струм зміщення», яке було введено Максвеллом для пояснення проходження струму через ділянку конденсатора, де зарядів нема. Мета статті – розкрити предметний зміст цього терміну і пояснити реальний механізм проходження струму в електричному колі.

Методи дослідження. Аналіз явища на основі таких традиційних понять як заряд, електричне поле, магнітне поле, електромагнітне поле, постійний електричний струм, змінний струм. Аналіз суперечності між поняттям струму як напрямленого руху зарядів і поняттям «струм зміщення» як струм без зарядів. Теоретичне узгодження понять «струм зміщення» і струм як напрямлений рух зарядів.

Отримані результати. Показано, що для всіх ділянок замкненого електричного кола визначення струму як напрямленого руху зарядів справедливе тільки для постійного струму, коли дійсно заряди рухаються на всіх ділянках кола. У колі з конденсатором постійний струм не протікає, оскільки в проміжку між пластинами конденсатора зарядів нема. Однак протікає змінний струм, який виникає в момент замикання кола. На ділянці провідника при цьому виникає напрямлений рух зарядів і причиною руху є електричне поле, яке змінне і виникає разом зі змінним магнітним полем на всіх ділянках кола, в тому числі й на ділянці конденсатора, де зарядів нема. Показано, що взагалі поняття струму як напрямленого руху зарядів є правильним, але умовно-абстрактним, бо насправді першопричиною є те, що називається електромагнітним полем. Поняття струму зміщення є умовно-абстрактним вираженням електромагнітного поля.

Наукова новизна. Новизна полягає в тому, що з'являється можливість адекватно і неабстрактно розуміти процеси, які відбуваються в електричному колі при проходженні струму, що не струм створює електричне поле навколо провідника, по якому напрямлено рухаються заряди, а навпаки, змінне електричне поле призводить до руху заряди, які є на ділянках провідника.

Практична цінність. Розуміння реальної суті терміну дає можливість правильно оцінювати процеси, які відбуваються в електричному колі. Чи при під'єднанні джерела е.р.с. і замиканні кола рух зарядів відбувається поступово, чи настає відразу по всьому колу. Дає можливість розуміти, що відбувається, коли електроди конденсатора під'єднуються до джерела е.р.с. Чому електрони в провіднику приходять у напрямлений рух, яка природа сили, що діє на електрони.

Ключові слова. Електричне поле; електромагнітне поле; електричний заряд; постійний електричний струм; змінний струм; струм зміщення.

I. ВСТУП

У навчальному процесі важливе значення має термінологія і її відповідність уявленням та поняттям про реальні фізичні процеси. Однак існує багато термінів, які є умовними і реально не відображають фізичних процесів. Наприклад, звичними є такі умовні терміни як «імпульс», «електричний заряд», «електричне поле», «гравітаційне поле», «електричний струм». Слово «заряд» виражає готовність до певної дії. Наприклад, зарядити рушницю – це вставити патрон і підготувати її до пострілу. Електрично зарядити тіло – означає створити на ньому надлишок електронів чи протонів і таким чином підготувати до взаємо-

дії на відстані з іншим зарядженим тілом через електричні поля, які виникають навколо них. Можна зарядити акумулятор. А що таке «електричне поле»? Це теж щось умовне. У математиці термін «поле» є синонімом слова «розподіл». Наприклад, «поле векторів» означає «розподіл векторів» на площині чи у просторі. «Електричне поле» теж означає розподіл «чогось» навколо зарядженого тіла. Така умовність переноситься і на поняття «електричний струм». Електричним струмом називається напрямлений рух зарядів. Реально це рух електронів, які переносять заряд. Величина струму дорівнює кількості заряду q , який проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу: $I = q / t$. Заряди також можуть ру-

хатися під дією електричного поля в провіднику або під дією електричного поля, створеного зарядженим тілом. Наприклад, якщо зарядити два тіла, так щоб їх потенціали були різними, і сполучити провідником, то електрони будуть рухатися від тіла з меншим потенціалом в сторону тіла, потенціал якого більший. Цей струм буде зменшуватися і припиниться, коли потенціали зрівняються. Це змінний струм. Змінний електричний струм може виникати також у замкненому електричному колі в момент його замикання. Вважається, що у замкненому колі заряд проходить через поперечний переріз провідника на всіх його ділянках, так ніби він циркулює по всьому замкненому колу. Однак особлива ситуація виникає, коли в замкненому колі знаходиться конденсатор. В момент замикання такого електричного кола з'являється струм, який фіксується вимірювальним приладом. На ділянках провідника струм – це рух зарядів, але на ділянці конденсатора між його електродами існує розрив і там зарядів нема, отже рухатися вони не можуть. У зв'язку з цим виникає питання: а що таке струм, якщо напрямленого руху зарядів нема? Потрібне фізичне пояснення цієї проблеми.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Ознакою струму є магнітне поле навколо провідника. Це помітив ще Ерстед (1820 р.), тому традиційно вважається, що навколо струму створюється магнітне поле [1]-[5].

Такі уявлення про струм сформувались історично і формально відображають процеси, пов'язані з протіканням струму в електричному колі. Вони справедливі для струму, який протікає в провіднику. Однак трактування, що струм як напрямлений рух зарядів створює магнітне поле, не підходить для змінного струму, на що звернув увагу Максвелл, створюючи теорію електромагнітних хвиль [6]-[11].

Отже, існує проблема проходження струму у замкненому електричному колі на ділянці, де електричних зарядів нема. Якщо в електричному колі знаходиться конденсатор C , то фактично існує розрив електричного кола і струм як напрямлений рух зарядів протікати не може, тому що зарядів у проміжку між пластинами конденсатора нема і їх руху бути не може (рис. 1).

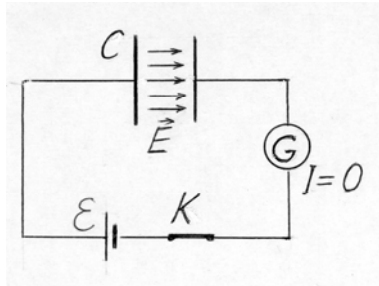


Рисунок 1. В електричному колі з конденсатором постійний струм не протікає

Так що в замкненому електричному колі з конденсатором постійний струм взагалі протікати не може. Однак при замиканні кола відбувається різке зростання і подальше швидке спадання струму (рис. 2).

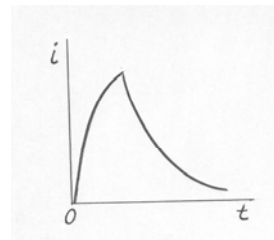


Рисунок 2. При замиканні кола відбувається різке зростання і спадання струму

Виходить, що в області, де зарядів нема, постійний струм протікати не може, а змінний струм – протікає. Тому необхідно з'ясувати, чому вважається, що струм іде по всьому замкненому колу, і навіть там, де заряди на ділянці конденсатора не переміщуються, тоді як за визначенням струм – це напрямлений рух зарядів. Як бачимо, щось не так або з визначенням струму як напрямленого руху зарядів, або з уявленням, що струм протікає по всьому колу.

Оскільки в конденсаторі напрямленого руху зарядів нема, то Максвеллу довелося ввести умовне абстрактне поняття «струм зміщення», яке він пов'язав зі змінним електричним полем, що виникає в момент замикання кола.

Саме такий термін використовується у сучасній науковій і навчальній літературі [12]-[16].

III. МЕТА РОБОТИ

Мета статті – розкрити предметний зміст терміну «струм зміщення» і пояснити реальний механізм проходження струму в електричному колі.

В електротехніці, радіотехніці вживаються такі поняття як заряд, електричне поле, магнітне поле, електромагнітне поле, постійний електричний струм, змінний струм. Ці абстрактні поняття відображають певні реальні фізичні явища. Наприклад, струм розуміється як напрямлений рух електричних зарядів [2].

Дещо складніше з умовним абстрактним поняттям «струм зміщення», введеним Максвеллом для пояснення проходження струму через ділянку конденсатора, де зарядів нема.

Розглянемо детальніше процеси, які відбуваються при замиканні електричного кола з конденсатором.

При замиканні кола від джерела е.р.с. ϵ до однієї з пластин конденсатора заряди притікають, а від другої – відтікають (рис. 3).

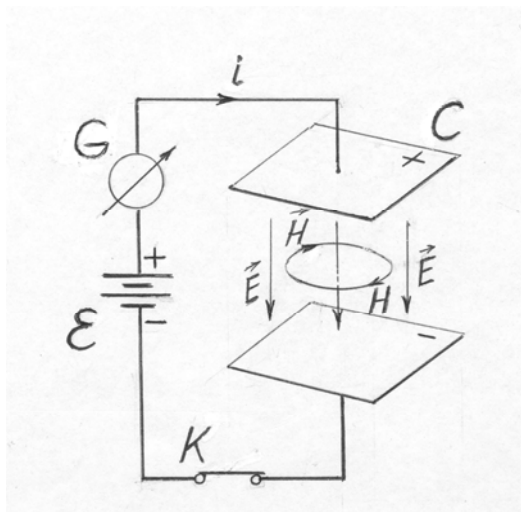


Рисунок 3. Представлення зміни електричного поля як «струму зміщення»

Тобто, відбувається зміщення зарядів стосовно пластин і «зарядка» конденсатора. Відбувається також відповідна зміна електричного поля \vec{E} в проміжку між пластинами.

В конденсаторі без діелектрика існує електричне поле напруженістю \vec{E} (чи електричне зміщення $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E}$). Напруженість електричного поля в конденсаторі виражається через поверхневу густину заряду σ на пластині: $E = \sigma / \epsilon_0$.

Відповідно електричне зміщення $D = \sigma$ і заряд на пластині $q = \sigma S$. Сила струму зміщення

$$i_{zm} = \frac{dq}{dt} = S \frac{dD}{dt}.$$

Густина струму зміщення

$$j_{zm} = \frac{i_{zm}}{S} = \frac{dD}{dt}.$$

Як бачимо, поняття «струм зміщення» цілком умовне. Формально струм ніби протікає по всьому замкненому колу, але вважається, що на ділянці конденсатора струм – це не рух зарядів, а зміна електричного поля. Тому Максвелл умовно й назвав цю зміну «струмом зміщення». Виходить, що традиційне означення струму по суті не відображає механізму протікання струму. Таким чином, існує потреба конкретизувати фізичний зміст поняття «електричний струм» і механізм його протікання.

Отже, при замиканні кола з конденсатором з'являється електричний струм, який ніби тече по всьому замкненому колу. На ділянці провідника струм розглядається як напрямлений рух зарядів (рис. 1). Традиційно (ще з часів Ерстеда, 1820 р.) вважається, що ознакою електричного струму є магнітне поле, яке виникає навколо нього. Коли струм тече по провіднику, то є реальне переміщення зарядів (електронів) і існує зв'язок між напрямленим рухом зарядів і маг-

нітним полем навколо провідника. Можна уявляти, що магнітне поле створюється струмом зарядів, які рухаються напрямлено. Однак на ділянці конденсатора електронів нема, отже нема їх руху. Але магнітне поле як ознака струму на ділянці конденсатора існує. Тому логічно зробити висновок, що не струм як напрямлений рух зарядів створює магнітне поле, а навпаки – заряди рухаються тому, що є магнітне поле, яке існує на всіх ділянках кола, в тому числі й наділянці провідника. Важливо зауважити, що йдеться саме про змінне магнітне поле, яке виникає в момент замикання кола. Як бачимо, існує неузгодженість в логіці міркувань.

Тому потрібно з'ясувати, що ж є первинним у визначенні поняття струму як напрямленого руху зарядів? Струм, який створює магнітне поле, що є ознакою струму, чи магнітне поле якимось чином є причиною руху зарядів?

IV. ОБГОВОРЕННЯ

Відповідь знаходиться у рівняннях Максвелла, з яких випливає, що змінне магнітне поле існує одночасно зі змінним електричним полем. Це випливає з рівнянь Максвелла в інтегральному вигляді [9]:

$$\oint_1 \vec{H} d\vec{l} = \int_s \frac{d\vec{D}}{dt} d\vec{s} + \int_s \vec{j} d\vec{s},$$

$$\oint_1 \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \left(\int_s \vec{B} d\vec{s} \right),$$

$$\int_s \vec{B} d\vec{s} = 0,$$

$$\int_s \vec{D} d\vec{s} = q.$$

Або в диференціальному вигляді:

$$\frac{dH_z}{dy} - \frac{dH_y}{dz} = \frac{dD_x}{dt} + j_x,$$

$$\frac{dH_x}{dz} - \frac{dH_z}{dx} = \frac{dD_y}{dt} + j_y,$$

$$\frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy} = \frac{dD_z}{dt} + j_z,$$

$$\frac{dB_x}{dx} + \frac{dB_y}{dy} + \frac{dB_z}{dz} = 0.$$

$$\frac{dE_z}{dy} - \frac{dE_y}{dz} = - \frac{dB_x}{dt},$$

$$\frac{dE_x}{dz} - \frac{dE_z}{dx} = - \frac{dB_y}{dt},$$

$$\frac{dE_y}{dx} - \frac{dE_x}{dy} = - \frac{dB_z}{dt},$$

Тут E і H – напруженості, а D і B – індукції електричного і магнітного полів, які взаємно пов'язані

між собою [9].

А це значить, що при замиканні кола відбувається зростання магнітного поля і електричного поля. І ця зміна відбувається не тільки між пластинами конденсатора, але також на всіх ділянках провідника (рис. 3). Оскільки в провіднику є заряди, то вони й приходять у рух під дією електричного поля і створюють електричний струм провідності у його традиційному тлумаченні. На проміжку ж між пластинами конденсатора руху зарядів нема і струму провідності також нема, але є змінне електричне поле E і змінне магнітне поле H . Якщо розкрити пластини конденсатора, то в простір будуть випромінюватися електромагнітні хвилі (рис. 4).

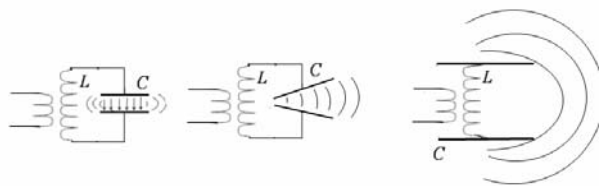


Рисунок 4. При розкритих пластинах конденсатора в простір випромінюються електромагнітні хвилі

Таким чином, насправді йдеться про виникнення електромагнітного поля як одночасного зростання чи спадання напруженостей електричного і магнітного полів, що й впливає з рівнянь Максвелла. Так що не рух зарядів є першопричиною магнітного поля навколо струму, а заряди в провіднику рухаються і створюють струм завдяки електричному полю E , що виникає разом з магнітним полем при замиканні електричного кола.

Виходить щось подібне до того, коли вважали, що Сонце обертається навколо Землі, а потім виявилось, що Земля обертається навколо своєї осі, а здається, що обертається Сонце. Тобто, термін «струм зміщення» є цілком умовним і абстрактним поняттям.

Зміна електричного і магнітного полів являє собою електромагнітну хвилю, яка поширюється в усі сторони від провідника, що реалізується в антені передавального радіотехнічного пристрою.

V. ВИСНОВКИ

Традиційно електричний струм розглядається як напрямлений рух зарядів і ознакою струму є магнітне поле, яке виникає навколо струму. Для замкненого кола таке визначення струму справедливе тільки для постійного струму, коли дійсно заряди рухаються на всіх ділянках кола. У колі з конденсатором постійний струм не протікає, оскільки в проміжку між пластинами конденсатора зарядів нема. Однак протікає змінний струм, який виникає при замиканні кола. На ділянці провідника причиною руху зарядів є електричне поле, яке змінне і виникає разом зі змінним магнітним полем на всіх ділянках кола, в тому числі й на

ділянці конденсатора, де зарядів нема. Так що взагалі поняття струму як напрямленого руху зарядів є правильним, але умовно-абстрактним, бо насправді першопричиною є те, що називається електромагнітним полем. Поняття струму зміщення також є умовно-абстрактним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Савельев И.В. Курс общей физики, т. 2 / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1978. – С.110.
- [2] Кингсеп А.С. Курс общей физики. Учебное пособие для вузов, т. 1. / А.С. Кингсеп, Г.Р. Локшин, О.А. Ольхов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – С. 244.
- [3] Бутиков Е.И. Оптика. / Е.И. Бутиков. – М.: Высшая школа. 1986. – 512 с.
- [4] Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия. 1983. – С. 507.
- [5] Hans C. Physics second edition, expandet. Hans C. Ohanian. Rensselaer politedinic institute. W.w.Norton & company / Hans C. New York. London. 1988. P. 971-972.
- [6] Алешкевич В.А. Курс общей физики. Оптика / В.А. Алешкевич – М. ФИЗМАТЛИТ. 2010. – С.7.
- [7] Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике/ Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сендс. Т. 6. – М.: Мир. 1966. – С. 119.
- [8] Hans C. Physics second edition, expandet. Hans C. Ohanian. Rensselaer politedinic institute. W.w.Norton & company / Hans C. New York. London. 1988. P. 971-972.
- [9] Sus' B.A. Unusual interpretation of traditional physics problems. The third scientific-methodological edition / B.A. Sus', B.B. Sus', O.B. Kravchenko. – Kyiv: PC "Prosvita", 2012. – 121 pages.
- [10] Paul A. Tipler, Gene Moska. Physics for scientists and engineers. With modern physics. – W.H. Freeman and Company. New York. 2008. – P. 1029 с.
- [11] Roumond A. Serway, John W.Jewett. Physics for Scientists and Engineers. 2018. – P. 955.
- [12] Сивухин Д.В. Курс общей физики. Т. 3. Электричество / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1977. – С. 347. .
- [13] Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – М.: Наука, 1985. . – С. 285
- [14] Калитиевский Н.И. Волновая оптика / Н.И. Калитиевский – Москва: Высшая школа, 1978. – С. 11.
- [15] Карпов Я.С. Концепції сучасного природознавства /Я.С. Карпов, В.В. Кисельник, В.Г. Кремень та ін. – Київ: Професіонал, 2004. – С. 171.
- [16] Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф Б.М. – М.: ГИФМЛ, 1963. – С.119.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2020

DEVELOPMENT OF IDEAS ABOUT "BIAS CURRENT"

HROKHOLSKYI
J. M.

Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Automated Control Systems of the Professor of the Department of Automatic Control Systems of the Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Krut, Kiev, Ukraine, E-mail: GGYM@ukr.net;

SUS B. A.

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of the Department of Mathematics and Physics of the Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Krut Kiev, Ukraine, E-mail: bogdansus@gmail.com.

Purpose. In electrical engineering, radio engineering, such concepts as charge, electric field, magnetic field, electromagnetic field, direct electric current, alternating current are used. These abstract concepts reflect certain real physical phenomena. For example, current is understood as the directed movement of electric charges. However, there is also a conditionally abstract concept of "bias current", which was introduced by Maxwell to explain the passage of current through a section of capacitor where there are no charges. The purpose of the article is to reveal the substantive meaning of this term and to explain the real mechanism of current flow in an electric circuit.

Methodology. Analysis of the phenomenon is performed on the basis of such traditional concepts as charge, electric field, magnetic field, electromagnetic field, direct electric current, alternating current. Analysis of the contradiction between the concept of current as a directed movement of charges and the concept of "bias current" as a current without charges is presented. Theoretical coordination of the "bias current" concepts and current as a directed motion of charges is done.

Findings. It is shown that for all sections of a closed electric circuit, the definition of current as a directed movement of charges is valid only for direct current, when the charges are actually moving in all sections of the circuit. In the circuit with the capacitor, direct current does not flow, because there are no charges in the gap between the plates of the capacitor. However, alternating current occurs, at the moment when the circuit is closed. In the area of the conductor there is a directed movement of charges and the cause of the movement is an electric field, which is variable and occurs together with the alternating magnetic field in all parts of the circuit, including the part of the capacitor where there are no charges. It is shown that in general the concept of current as a directed motion of charges is correct, but conditionally abstract, because in fact the root cause is what is called an electromagnetic field. The concept of bias current is a conditionally abstract expression of the electromagnetic field.

Originality. The novelty is that it is possible to understand adequately and non-abstractly the processes that occur in an electric circuit during the passage of current, that no current creates an electric field around the conductor on which charges move, and vice versa, alternating electric field leads to charges, which are in the conductor areas.

Practical value. Understanding the real essence of the term makes it possible to assess correctly the processes occurring in the electrical circuit; gives the answer whether the movement of charges occurs gradually or immediately around the circle when connecting an e.r.s. and closing the circuit. This understanding gives you an idea of what happens when the capacitor electrodes are connected to an e.r.s. and why do the electrons in a conductor come in a directed motion, what is the nature of the force acting on the electrons.

Key words. Electric field; electromagnetic field; electric charge; direct electric current; alternating current; bias current.

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О «ТОКЕ СМЕЩЕНИЯ»

ГРОХОЛЬСКИЙ
Я.М.

Канд. техн. наук, профессор кафедры автоматических систем управления Военного института телекоммуникаций и информатизации им. Героев крут, Киев, Украина, e-mail: GGYM@ukr.net;

СУСЬ Б. А.

Д-р пед. наук, профессор кафедры математики и физики Военного института телекоммуникаций и информатизации им. Героев крут, Киев, Украина, e-mail: bogdansus@gmail.com.

Цель работы. В электротехнике, радиотехнике используются такие понятия как заряд, электрическое поле, магнитное поле, электромагнитное поле, постоянный электрический ток, переменный ток. Эти абстрактные понятия отражают определенные реальные физические явления. Например, ток понимается как направленное движение электрических зарядов. Однако существует также условно-абстрактное понятие «ток смещения», которое было введено Максвеллом для объяснения прохождения тока через участок

конденсатора, где зарядов нету. Цель статьи - раскрыть предметное содержание этого термина и объяснить реальный механизм прохождения тока в электрической цепи.

Методы исследования. Анализ явления на основе таких традиционных понятий как заряд, электрическое поле, магнитное поле, электромагнитное поле, постоянный электрический ток, переменный ток. Анализ противоречия между понятием тока как направленного движения зарядов и понятием «ток смещения» как ток без зарядов. Теоретическое согласование понятий «ток смещения» и ток как направленное движение зарядов.

Полученные результаты. Показано, что для всех участков замкнутого электрической цепи определения тока как направленного движения зарядов справедливо только для постоянного тока, когда действительно заряды движутся на всех участках цепи. В цепи с конденсатором постоянный ток не протекает, поскольку в промежутке между пластинами конденсатора зарядов нету. Однако протекает переменный ток, который возникает в момент замыкания цепи. На участке проводника при этом возникает направленное движение зарядов и причиной движения является электрическое поле, которое переменное и возникает вместе с переменным магнитным полем на всех участках цепи, в том числе и на участке конденсатора, где зарядов нету. Показано, что вообще понятие тока как направленного движения зарядов является правильным, но условно-абстрактным, потому что в действительности первопричиной является то, что называется электромагнитным полем. Понятие тока смещения является условно-абстрактным выражением электромагнитного поля

Научная новизна. Новизна заключается в том, что появляется возможность адекватно и неабстрактное понимать процессы, которые происходят в электрической цепи при прохождении тока, что не ток создает электрическое поле вокруг проводника, по которому направлено движутся заряды, а наоборот, переменное электрическое поле приводит в движение заряды, которые есть на участках проводника.

Практическая ценность. Понимание реальной сути термина дает возможность правильно оценивать процессы, которые происходят в электрической цепи. Или при подключении источника ЭДС и замыкании цепи движение зарядов происходит постепенно, или наступает сразу по всей окружности. Дает возможность понимать, что происходит, когда электроды конденсатора подсоединяются к источнику ЭДС. Почему электроны в проводнике приходят в направленное движение, какова природа силы, действующей на электроны.

Ключевые слова. Электрическое поле; электромагнитное поле; электрический заряд; постоянный электрический ток; переменный ток; ток смещения.

REFERENCES

- [1] Savel'ev, I.V. (1978). Kurs obshhej fiziki. Vol. 2, Moscow, Nauka, 110.
- [2] Kingsep, A.S., Lokshin, G.R., Ol'xov, O.A. (2007). Kurs obshhej fiziki. Uchebnoe posobie dlya vuzov, Vol. 1, Moscow, FIZMATLIT, 244.
- [3] Butikov, E.I. (1986). Optika. Moscow, Vysshaya shkola, 512.
- [4] Fizicheskij e'nciklopedicheskij slovar' (1983). Moscow, Sov. e'nciklopediya, 507.
- [5] Hans, C. (1988). Physics second edition, expandet. Rensselaer politedinic institute. W.w.Norton & company, New York, London, 971-972.
- [6] Aleshkevich, V.A. (2010). Kurs obshhej fiziki. Optika. Moscow, FIZMATLIT, 7.
- [7] Fejnman, R., Lejton, R., Sends, M. (1966) Fejnmanovskie lekcii po fizike. Vol. 6, Moscow, Mir, 119.
- [8] Hans, C. (1988). Physics second edition, expandet. Hans C. Ohanian. Rensselaer politedinic institute. W.w.Norton & company. New York, London, 971-972.
- [9] Sus', B.A., Sus', B.B., Kravchenko, O.B. (2012). Unusual interpretation of traditional physics problems. The third scientific-methodological edition. Kyiv, PC Prosvita, 121.
- [10] Paul, A. Tipler, (2008). Gene Moska. Physics for scientists and engineers. With modern physics. New York, 1029.
- [11] Roumond, A. Serway, John W. Jewett. (2018). Physics for Scientists and Engineers. 955.
- [12] Sivuxin, D.V. (1977). Kurs obshhej fiziki. T. 3. E'lek-trichestvo. Moscow, Nauka, 347.
- [13] Kalashnikov, S.G. (1985). E'lek-trichestvo. Moscow, Nauka, 285.
- [14] Kalitievskij, N.I. (1978). Volnovaya optika. Moscow, Vysshaya shkola, 11.
- [15] Karpov, Ya.S., Kisel'nik, V.V., Kremen', V.G. (2004). Konceptii suchasnogo prirodz-navstva. Kyiv: Profesional, 171.
- [16] Yavorskij, B.M., Detlaf, A.A. (1963). Spravochnik po fizike. Moscow, GIFML, 119.

ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІД ЧАС РУШАННЯ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

ХРЕБТОВА О.А. канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: 34092@ukr.net;

ЗАЧЕПА Н.В. канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net

Мета роботи. Проведення експериментальних досліджень температурних режимів асинхронного двигуна під час рушання на лабораторному комплексі. Отримання реальних характеристик процесу нагрівання під час виконання рушання, оцінка його впливу на стан ізоляції асинхронного двигуна, підтвердження адекватності непрямого методу визначення температури нагрівання обмоток асинхронного двигуна під час формування циклічного пускового моменту в процесі рушання.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використовувалося математичне моделювання за вперше отриманими математичними виразами що розраховують температури обмотки статора під час рушання з урахуванням впливу частоти напруги живлення на параметри асинхронного двигуна. Фізичне моделювання на розробленому лабораторному стенді режимів рушання з фіксування температури під час кожного етапу експерименту для підтвердження теоретичних досліджень рушання при імпульсному характері пускового моменту.

Отримані результати. Застосування різних методів побудови еквівалентних теплових схем (ЕТС) для розрахунку температурних режимів АД вимагає значних ресурсовитрат, що є нерентабельним, коли ротор машини нерухомий як у випадку рушання. З використанням методу визначення втрат у сталі в режимі глибокого насичення виведені математичні залежності розрахунку температурного режиму під час виконання алгоритму, що враховує зміну властивостей обмотки статора під час нагрівання, розраховані допустимі параметри перевантаження за струмом з урахуванням допустимого нагрівання обмоток статора. У роботі отримані математичні залежності для розрахунку температурних режимів обмоток статора під час формування циклічного пускового моменту для виконання рушання, що враховують зміну початкових умов рушання для кожного циклу і зміну властивостей обмоток статора під час нагрівання. Розроблений лабораторний комплекс дозволяє проводити дослідження температурних режимів обмотки статора при рушанні асинхронного двигуна із загальмованим ротором, при завданні різних значень амплітуди і частоти напруги живлення. Результати досліджень вказують, що математичні залежності, виведені в роботі дозволяють забезпечити контроль температури нагрівання аналітичним методом. Аналіз режимів роботи асинхронного двигуна під час виконання рушання підтвердив необхідність контролю температурних показників обмоток статора для попередження виникнення аварійних ситуацій. В цілому при рушанні з застосуванням покрокової подачі напруги живлення зниженою частоти для отримання підвищеного пускового моменту, нагрів обмоток статора відбувається повільніше в порівнянні з нагріванням при тривалому режимі роботи асинхронного двигуна із загальмованим ротором, що дозволяє виконувати багаторазові спроби рушання на зниженій частоті з великою амплітудою напруги живлення.

Наукова новизна. Вперше отримані та експериментально підтвердженні математичні залежності для розрахунку температури обмоток статора під час рушання зі загальмованим ротором асинхронної машини, що враховують зміну властивостей обмотки статора під час нагрівання та вплив частоти напруги живлення.

Практична цінність. Вперше пропонується непрямий метод контролю температури нагрівання обмоток статора асинхронної машини під час рушання для запобігання виникненню аварійних ситуацій на технологічному обладнанні що пускається під навантаженням.

Ключові слова: обмотки статора асинхронної машини; температурний режим; параметри асинхронної машини; частоти напруги живлення; експериментальний комплекс.

І. ВСТУП

Рушання і пуск деяких технологічних механізмів може супроводжуватися значними моментами опору, тому виникає необхідність виконання передпусковий підготовки за рахунок формування моменту рушання

більше пускового в кілька разів [1].

Дослідження зі створення великого пускового моменту проводилися по відношенню до підйомно-транспортних механізмів. На даний момент система електроприводу механізму підйому все частіше вико-

нується на базі асинхронного двигуна з реостатним пуском. При виконанні технологічних операцій підйому може виникати аварійні ситуації під впливом збільшеного моменту опору під час рушення, такі як порушення цілісності ізоляції обмоток двигуна або підгоряння контактів реостатних опорів. Причинами аварійних ситуацій, як правило, є великі пускові струми, значні ударні моменти при виконанні реостатного пуску в наслідок зміни фізико-хімічних властивостей ущільнювальної гуми в процесі експлуатації, деформації контактних поверхонь, засмічення направляючих, зміни жорсткості каната при рушення за твору [1], нелінійності характеру тертя в системі, викиданого різницею коефіцієнта тертя спокою і початком проковзування [2], самим проковзуванням коліс механізму.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Виконання режимів рушення і передстартової підготовки за рахунок простих законів частотного управління дозволяє не тільки підвищувати значення пускового моменту асинхронного двигуна (АД), але і забезпечувати необхідну інтенсивність його збільшення. Однак закони частотного управління що застосовуються, не враховують зміну електромагнітних параметрів асинхронної машини при зниженні частоти напруги живлення і, як наслідок, вибрані параметри управління при формуванні великого пускового моменту за рахунок роботи на зниженій частоті ($5\div 20$ Гц) можуть виявитися неефективними [3]. Теоретичні дослідження підтвердили можливість отримання максимально допустимого пускового моменту з мінімальним пусковим струмом в області низьких частот [4]. Доведено, що при визначенні параметрів напруги живлення для частотно-регульованого асинхронного електроприводу (ЧРЕП) необхідно враховувати вплив кривої намагнічування на параметри самого АД [3].

Для підтвердження працездатності теоретичних досліджень по формуванню великого пускового моменту в області низьких частот при струмі статора, що не перевищує пусковий, необхідно провести експериментальні дослідження на реальному обладнанні.

III. МЕТА РОБОТИ

Під час виконання передпускової підготовки для руйнування адгезивних шарів робочого органа в робочому положенні необхідно сформувати за допомогою електропривода достатні зусилля для рушення. Максимально допустимий пусковий момент формується за умови дотримання допустимого перевантаження за струмом. У деяких випадках для виконання рушення технологічних механізмів формування моменту з допустимим перевантаженням за струмом недостатньо [5].

У разі недостатнього рушійного моменту вал двигуна, а, отже, і ротор асинхронної машини перебувають у нерухомому стані. Пусковий струм відповідає

струму короткого замикання і є джерелом нагрівання обмоток асинхронної машини. Температура нагрівання залежить від амплітудного значення струму та часу його дії $\Theta = F(I, t)$ [6].

Тому процеси рушення і пуску виконуються під час короткочасного створення значних пускових моментів і мають імпульсний характер.

З огляду на короткочасний характер пускових моментів можна формувати сигнали частоти f_1 і напруги U живлення, за яких струмове перевантаження асинхронного двигуна АД більше допустимого $I_1 > I_{пвск.max}$, але на допустимо короткий період часу, за якого не відбудеться порушення цілісності ізоляції унаслідок нагрівання провідника.

Метою роботи є проведення експериментальних досліджень температурних режимів асинхронного двигуна під час рушення на лабораторному комплексі. Дослідження режимів дозволяє отримати реальні характеристики процесу нагрівання, оцінити його вплив на стан ізоляції асинхронного двигуна [7], підтвердити адекватність непрямого методу визначення температури нагрівання обмоток асинхронного двигуна під час формування циклічного пускового моменту в процесі рушення [6].

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Під час рушення, коли ротор знаходиться в нерухомому стані та рух повітря, укладеного всередині закритого двигуна, відсутній, має місце адіабатний процес, тобто тепловіддача практично відсутня: $\lambda \approx 0$ [8]. Під час виконання рушення тривалість формованого пускового моменту становить $0,02\div 1$ с. [4]. Час імпульсу пускового моменту набагато менший за теплову постійну часу нагрівання асинхронного двигуна: $t_{imp} \ll T$.

Тепло, що виділяється в провідниках обмоток статора за відсутності примусового охолодження і короткочасності теплового процесу, не встигає передаватися повітрю, що може призвести до перевищення максимально допустимої температури нагрівання обмотки. Визначати температурні режими обмоток статора з нагрівання корпусу двигуна для цього режиму неприпустимо. Застосування прямого методу вимірювання температури обмоток статора під час рушення дуже важко, так як датчики температури мають значну інерційність, що може призвести до некоректної фіксації вимірюваного параметра. Тому аналітичний метод визначення нагрівання обмотки статора дозволить отримати точніший результат.

Процес рушення і пуску супроводжується наявністю пускових струмів, що перевищують номінальні в $3\div 10$ разів, асинхронна машина піддається тепловим навантаженням зі значним моментом опору на валу двигуна, і природно, що за короткий час виділяється велика кількість теплової енергії [9], [10]. Для запобігання перегрівання обмоток двигуна під час форму-

вання пускових моментів процесу рушання необхідно контролювати час роботи АД.

Під час розрахунку температури нагрівання обмоток статора приймемо такі припущення: фазні обмотки симетричні та зрушені в просторі на 120° ; магніторухливі сила обмоток і магнітних полів розподілена синусоїдально вздовж повітряного зазора; ротор електрично та магнітно симетричний.

Застосування різних методів побудови еквівалентних теплових схем (ЕТС) для розрахунку температурних режимів АД – складне завдання, що вимагає значних ресурсозатрат [11]. У цьому випадку і з урахуванням вищевикладених припущень застосування ЕТС нерентабельно, тому що теплові схеми описують фізичні процеси, які відбуваються в асинхронній машині при $\omega_s \neq 0$ і при $\omega_s = 0$. Тому під час розрахунку окремого випадку, коли ротор машини нерухомий, велика частина змінних у рівняннях ЕТС дорівнює нулю і складність розрахунку не відповідає поставленому завданню. Під час описаного вище режиму роботи АД більшою мірою, порівняно з іншими частинами асинхронної машини, будуть нагріватися обмотки статора, тому що струм, який протікає в обмотках статора, дорівнює:

$$I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_\mu^2}, \quad (1)$$

де I_2 – струм ротора; I_μ – струм контуру намагнічування.

З урахуванням того, що процес рушання короткочасний, має імпульсивний характер і рух АД відсутній, то пусковий струм статора вважаємо незмінним $I_1 = const$ [12]. Тому, з огляду на прийняті допущення, температуру нагрівання АД раціонально контролювати за нагріванням обмотки статора однієї з фаз. Величина активного опору знаходиться з відомої залежності [13]:

$$R = R_0(1 + \alpha\Theta(t)), \quad (2)$$

де R_0 – опір обмотки статора в холодному стані, Ом; α – температурний коефіцієнт, $1/^\circ\text{C}$.

Рівняння енергетичного балансу провідника фази обмотки статора з урахуванням (2) можна описати такою математичною залежністю:

$$\Delta P_1(1 + \alpha\Theta(t)) = Cm \frac{d\Theta_{np}}{dt}; \quad (3)$$

$$\Delta P_1 = I^2 R_1 + \Delta P_{cm},$$

де ΔP_1 – загальні втрати в обмотках статора зі зміною частоти напруги живлення, Вт; ΔP_{cm} – втрати в сталі, Вт; I_c – струм статора, А; R_1 – активний опір обмотки кола, Ом; t – час дії струму, с.; C – питома теплоємність, Дж/(кг·К); $m = \rho Sln$ – маса провідника, кг; ρ – щільність матеріалу обмотки, кг/м³; S – площа перерізу провідника, м²; l – довжина провідника обмотки

фази статора, м; n – кількість провідників; Θ_{np} – температура нагрівання, $^\circ\text{C}$.

Відомо, що зміна частоти напруги живлення впливає на зміну параметрів електромагнітного кола асинхронної машини [14], тому втрати в сталі вираховуються за методикою, запропонованою в [14], де в режимі насичення втрати визначаються так:

$$\Delta P_{cm} = \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I_\mu)}{dI_\mu}\right)^2} (E(I_\mu))^2, \quad (4)$$

де ξ – конструктивний коефіцієнт, що залежить від параметрів феромагнітного матеріалу (0,003–0,004) у разі насичення; I_μ – струм магнітного кола асинхронної машини, А; $E(I_\mu)$ – залежність кривої намагнічування від струму намагнічування [14].

Отже, рівняння енергетичного балансу з урахуванням утрат у сталі зі зниженням частоти напруги живлення має вигляд:

$$\left(I^2 R_1 + \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I_\mu)}{dI_\mu}\right)^2} (E(I_\mu))^2 \right) (1 + \alpha\Theta(t)) = Cm \frac{d\Theta_{np}}{dt}. \quad (5)$$

Контроль температурного режиму виконується не тільки в процесі рушання і пуску, коли асинхронна машина знаходиться в області насичення магнітопроводу, але і під час виконання технологічних робіт з використанням закону частотного керування $u/f = const$. У таких випадках облік втрат сталі в двигуні в ненасиченому стані магнітної системи розраховується за (4), де конструктивний коефіцієнт ξ' змінюється на $\xi' = 0,002$.

Залежність зміни температури обмотки із загальмованим ротором у часі з урахуванням зміни опору під час нагрівання струмом $I_c = const$, а також за нульових початкових умов, розраховується за виразом:

$$\Theta(t) = -\frac{1}{\alpha} + \left(\Theta_0 + \frac{1}{\alpha} \right) e^{\frac{\Delta P_1 \alpha}{Cm} t},$$

або

$$\Theta(t) = -\frac{1}{\alpha} + \left(\Theta_0 + \frac{1}{\alpha} \right) e^{\frac{\left(I^2 R_1 + \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I_\mu)}{dI_\mu}\right)^2} (E(I_\mu))^2 \right) \alpha}{Cm} t}. \quad (6)$$

Відповідно до початкових умов залежність (6) вірна під час виконання першої спроби рушання, коли

температура обмоток статора двигуна відповідала температурі навколишнього середовища, тому що електрична машина була не під напругою і без руху.

У разі прикладання напруги до асинхронного двигуна з розрахунковими параметрами для здійснення спроб рушання повторно через короткий період часу, який характеризує паузу, початкові умови для (6) визначаються значенням нагрівання від попереднього струмового імпульсу Θ_{i-1} , де i – номер імпульсу моменту, який формується для АД під час рушання.

Вираз (6) з урахуванням заданих початкових умов набуває такого вигляду:

$$\Theta_i(t) = -\frac{1}{\alpha} + \left(\Theta_{i-1} + \frac{1}{\alpha} \right) e^{-\frac{\left(I_{ct}^2 R_1 + \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I_{\mu i})}{dI_{\mu i}} \right)^2} E(I_{\mu i}) \right) \alpha}{C_m}} (t_i - t_{i-1})}. \quad (7)$$

За (7), урахуовуючи параметри машини, розраховуємо допустиме значення температурної межі з урахуванням параметрів навколишнього середовища. Допустиме нагрівання електродвигуна визначається найменш теплостійкими матеріалами його конструкції. Таким матеріалом є ізоляція обмотки статора.

У нашому випадку гранична температура перегрівання обмотки класу С не перевищує 180 °С [16] і обмежується властивостями застосованих матеріалів. За одного і того самого навантаження електродвигуна його нагрівання буде неоднаковим за різних температур навколишнього середовища. Розрахункова температура Θ_0 довіллія дорівнює 20 °С [16].

З виразу (6) визначаємо допустимий час роботи двигуна для заданої температурної межі Θ_{dop} :

$$t_i = \frac{C_m}{\Delta P_{li} \alpha} \ln \left(e^{-\frac{\left(I_{ct}^2 R_1 + \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I_{\mu i})}{dI_{\mu i}} \right)^2} E(I_{\mu i}) \right) \alpha}{C_m}} (t_i - t_{i-1})} \right). \quad (8)$$

Цей вираз дозволяє визначити час, за якого двигун працює зі струмами, значення яких $I_c \geq I_{pysk-max}$, але середнє нагрівання обмоток за імпульс не перевищує Θ_{dop} .

Отже, застосовуємо непряний метод контролю нагрівання обмоток статора під час виконання передпускової підготовки та рушання і маємо можливість запобігти виникненню аварійних ситуацій та збереження цілісності ізоляції обмоток статора АД.

Для підтвердження працездатності теоретичних

досліджень з формування пускового моменту в області низьких частот зі струмом статора, що не перевищує пусковий, необхідно провести експериментальні дослідження на реальному обладнанні.

Експериментальні дослідження склалися з дослідження температурних режимів з імпульсним характером пускового моменту [17].

Застосування перетворювача частоти (ПЧ) у цих умовах обумовлено не тільки можливістю підвищення керованості технологічним процесом, а й здатністю силових перетворювачів частоти працювати з короткочасним перевантаженням за струмом [18]. У табл. 1 наведені гранично допустимі режими навантаження, які повинні забезпечуватися ПЧ за номінальної напруги живлення.

Таблиця 1. Режими навантаження перетворювачів частоти до 80 кВА

№	Наван- таження % від $I_{nom.}$	Трива- лість наван- таження, с.	Середнє значення струму про- тягом цик- лу, % від $I_{nom.}$	Час цик- лу, хв.
1	125	900	100	30
2		300	110	10
3	150		100	30
4		10		
5	175	30		
6		10		
7	200	30		
8		10		
9				
10				
11	225	10		

У [17] визначено час роботи ПЧ залежно від струмових перевантажень.

З урахуванням запропонованого алгоритму виконання рушання технологічного механізму необхідно контролювати не тільки перевантаження за струмом, а й динамічні. Діапазон струмових і динамічних перевантажень за часом роботи наведено на рис. 1

Зі збільшенням часу розгону, тобто збільшенням плавності зміни навантаження, динамічний коефіцієнт зменшується і розраховується за формулою:

$$K_d = f(T/T_{12}), \quad (9)$$

де $T_{12} = 2\pi/\Omega_{12}$ – період власних коливань системи; T – час розгону.

Істотне зниження K_d досягається зі збільшенням часу плавного навантаження T до значення T_{12} . Подальше збільшення часу розгону не дає істотного зниження динамічних навантажень і може призвести до погіршення керованості приводу [19].

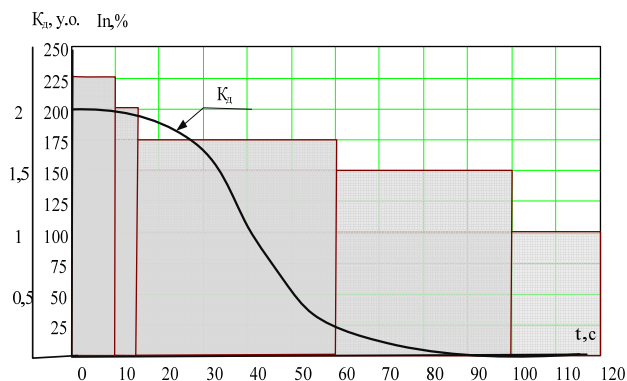


Рисунок 1. Діапазон струмових і динамічних перевантажень

За ДСТУ ПЧ не допускає перевантаження за струмом $2,25I_{ном}$ протягом 10 с. Постає питання, чи можливо сформувати режим рушання із загальмованим ротором частотно-регульованого електропривода з перевантаженням за струмом вище ДСТУ з імпульсним характером формування пускового моменту (період імпульсу 1–3 с).

Для експериментального підтвердження теоретично отриманих результатів розроблено лабораторний комплекс на базі асинхронного двигуна 4AA71A6Y3 з такими параметрами: $P = 0,37$ кВт, $U = Y/\Delta = 380/220$ В, $I = Y/\Delta = 1,1/1,9$ А, $\omega = 920$ об/хв, $R_l = 15,7$ Ом.

Лабораторний комплекс оснащений блоком датчиків струму і напруги, що дозволяє записувати миттєві значення параметрів за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) на персональний комп'ютер (ПК) у текстовому файлі для подальшої математичної обробки відповідно до етапів виконання експериментальних досліджень. Функціональна схема лабораторного комплексу наведена на рис. 2.

Асинхронний двигун, ротор якого через важіль ($l = 0,08$ м) з'єднаний з тензодатчиком, який, у свою чергу, жорстко зафіксовано на металоконструкції лабораторного комплексу, що імітує початковий момент рушання із загальмованим ротором, за заданими параметрами напруги живлення, встановленими на перетворювачі частоти, що виконує короточасний пуск з одночасним фіксуванням миттєвих значень струму і напруги (БД) → АЦП(m-DAQ) → ПК у вигляді текстового файлу з можливістю математичної обробки в програмі MathCAD для аналізу отриманих результатів [20].

Однак параметри ДСТУ стосуються нормальних режимів роботи системи ЕП, що не відповідає режимам рушання. У нашому випадку за рахунок налаштування параметрів перетворювача частоти, імпульсного характеру напруги, що прикладається, відсутності перегрівання обмоток АД може працювати за даного режиму і забезпечити виконання рушання.

Під час проведення експериментальних дослі-

джень температурних режимів асинхронного двигуна під час рушання із загальмованим ротором необхідно фіксувати не тільки діючі значення струму і напруги, а й миттєві значення струмів за всіма трьома фазами, так як із загальмованим ротором існує можливість електромагнітної несиметрії обмоток статора електричної машини.

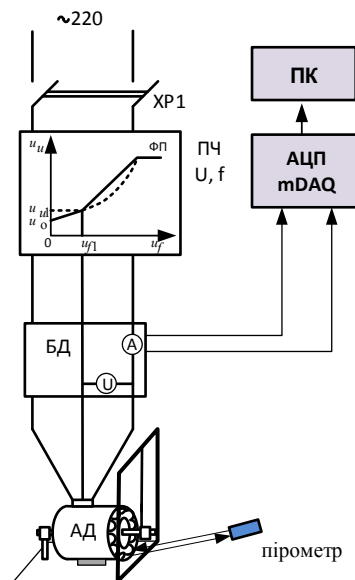


Рисунок 2. Функціональна схема лабораторного комплексу

З іншого боку, у зазначеному режимі джерелом нагрівання є пусковий струм, що протікає по обмотках статора. Отже, більшою мірою, порівняно з іншими частинами асинхронної машини, нагріватимуться саме обмотки статора і будуть джерелом нагрівання дотичних частин асинхронної машини. Оскільки одним із завдань під час рушання є запобігання перегрівання асинхронної машини, то контроль температури раціонально виконувати з нагріванням обмоток статора, без застосування ресурсозатратних ЕТС.

Під час проведення експерименту фіксувалися миттєві значення струмів кожного циклу роботи двигуна, значення температури протягом циклу із заданими значеннями часу роботи $t_p = 3$ с і часу паузи $t_n = 20$ с, що дозволило імітувати формування пускового моменту під час багаторазової спроби рушання. Максимально допустима початкова напруга джерела живлення під час рушання становить 40 % $U_{ном}$. В від можливого (380 В), зі зміною частоти з кроком 5 Гц у діапазоні 50 – 10 Гц. Алгоритм проведення одного циклу експерименту наведено на рис. 3.

Для реєстрації температури нагрівання обмотки статора двигуна використовувався пірометр типу Laser radiation, який виконує вимірювання на відстані 100–200 мм. Під час проведення експерименту була знята кришка асинхронного двигуна для забезпечення доступу до лобових частин обмоток статора. За один

період роботи АД виконувалося по два вимірювання пірометром на кожній фазі та фіксувалося усереднене значення.

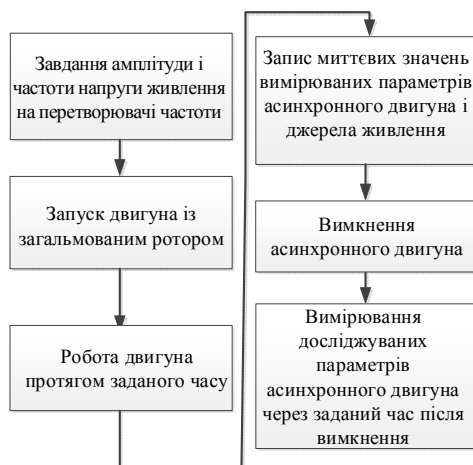


Рисунок 3. Алгоритм проведення одного циклу експерименту

За допомогою отриманих миттєвих значень струму на ПК виконано розрахунок значень струму однієї фази статора. Під час проведення експерименту діючі значення струму обмотки статора додатково фіксувалися амперметром з класом точності 2 %. Експериментальні та розрахункові значення досліджуваних параметрів асинхронного двигуна наведені на рис. 4.

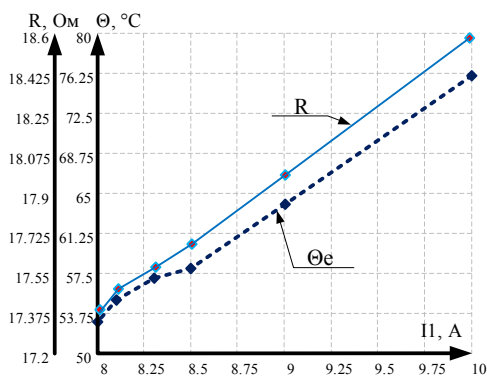


Рисунок 4 Графіки експериментальних залежностей температури та активного опору під час нагрівання обмоток пусковим струмом (I_c) протягом 90 с у разі виконання покрокового режиму рушання.

Результати експериментальних досліджень за заданими параметрами управління і розрахункові значення температури нагрівання з урахуванням початкових умов наведені у табл. 2.

Відносна похибка розрахункових значень температури нагрівання обмоток статора становить 1,6 %.

Таблиця 2. Результати експериментальних досліджень за заданими параметрами управління

№ пор.	Частота напруги живлення $f, \text{Гц}$	Розрахунковий струм обмотки статора $I_c, \text{А}$	Фактичний струм обмотки статора $I_c, \text{А}$	Активний опір обмотки статора $R, \text{Ом}$	Експериментальна температура $\Theta_e, ^\circ\text{C}$ обмотки статора за робочий час, $t_p, \text{с}$	Розрахункова температура $\Theta_p, ^\circ\text{C}$ обмотки статора за робочий час, $t_p, \text{с}$
1	10	10,2	10	15,85	5,5	5,4
2	15	9,18	9	15,85	4,4	4,312
3	20	8,65	8,5	15,85	4,2	4,143
4	25	8,49	8,3	15,85	4	3,851
5	30	8,26	8,1	15,85	3,9	3,875
6	35	8,12	8	15,86	3,5	3,36
7	40	8,1	8	15,87	3,3	3,2
8	45	8,08	8	15,89	3,1	3,05
9	50	8,08	8	15,9	3	2,9

V. ВИСНОВКИ

Застосування різних методів побудови еквівалентних теплових схем (ЕТС) для розрахунку температурних режимів АД вимагає значних ресурсовитрат, що є нерентабельним, оскільки теплові схеми описують фізичні процеси, що відбуваються в асинхронній машині за $\omega_d \neq 0$ і за $\omega_d = 0$. Тому, під час розрахунку окремого випадку, коли ротор машини нерухомий, значна частина змінних у рівняннях ЕТС дорівнює нулю і складність розрахунку не відповідає поставленому завданню. З використанням методу визначення втрат у сталі в режимі глибокого насичення виведені математичні залежності розрахунку температурного режиму під час виконання алгоритму, що враховує зміну властивостей обмотки статора під час нагрівання, розраховані допустимі параметри перевантаження за струмом з урахуванням допустимого нагрівання обмоток статора.

У роботі отримані математичні залежності для розрахунку температурних режимів обмоток статора під час формування циклічного пускового моменту для виконання рушання, що враховують зміну початкових умов рушання для кожного циклу і зміну властивостей обмоток статора під час нагрівання.

Отже, застосовуємо непрямий метод контролю нагрівання обмоток статора під час виконання передпускової підготовки та рушання і маємо можливість запобігти виникненню аварійних ситуацій та збереження цілісності ізоляції обмоток статора АД.

Розроблений лабораторний комплекс дозволяє проводити дослідження температурних режимів обмотки статора при рушанні асинхронного двигуна із загальмованим ротором, при заданні різних значень амплітуди і частоти напруги живлення. Результати досліджень вказують, що математичні залежності,

виведені в роботу дозволяють забезпечити контроль температури нагрівання аналітичним методом. Аналіз режимів роботи асинхронного двигуна під час виконання рушання підтвердив необхідність контролю температурних показників обмоток статора для попередження виникнення аварійних ситуацій.

В цілому при русанні з застосуванням покрової подачі напруги живлення зниженою частоти для отримання підвищеного пускового моменту, нагрів обмоток статора відбувається повільніше в порівнянні з нагріванням при тривалому режимі роботи асинхронного двигуна із загальмованим ротором, що дозволяє виконувати багаторазові спроби зрушення на зниженій частоті з великою амплітудою напруги живлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Хребтова О.А. Сергієнко С. А. Дослідження властивостей системи електропривода механізму підйому затвору зливної греблі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ, – 2012. – Вип. 3/2012 (19). – 660 с.
- [2] Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. – Харьков: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. – 408 с.
- [3] Chenchevoi V. Analysis of induction motors features taking into account change of iron properties / M. Zagirnyak, V. Chenchevoi, V. Ogar // Acta Technica. – Iss. 59/2014 (1). – PP. 25–47.
- [4] Хребтова О.А. Определение момента асинхронного двигателя при трогании / О.А. Хребтова, В.В. Ченчевой, В.А. Огарь // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, – 2013. – Вип. 4/2013 (24). – 106 с.
- [5] Balik J., Lukac P. On the kinetics of dynamic strain ageing. Kovove Mater. – 1998. V. 36. No. 1. P. 3–9.
- [6] Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. под ред. Мамиконяца. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
- [7] Михалев М. А., Михалева И. М. Основы теплопередачи. – М. : Энергия. 1977. – 342 с.
- [8] Обзор методов теплового расчета и существующих моделей. URL : http://www.physic-explorer.ru/obzor_metodov_teplovogo_rascheta_i_sushchestvuyushchih_modelей-441-1.html
- [9] Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. Е. А. Елисеева, А. В. Шинянского. – М. : Вища школа. 1983. – 616 с.
- [10] Гуревич Э. И. Переходные процессы в электрических машинах. / Э. И. Гуревич, Ю. Л. Рыбин // – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 316 с.
- [11] Носач Е. В. Процессы нагревания обмоток при пуске электрических машин. / Е. В. Носач, А. П. Черный, О. С. Воробейчик // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-виробничий журнал. – 2011. – № 1. С. 75–79.
- [12] Шидловська Н. А. Нелінійні кола з тепловими втратами. – К. : Наукова думка. 2002. – 160 с.
- [13] Огарь В. О. Родькин Д. Й. Характеристики асинхронных двигунів з урахуванням нелінійних властивостей магнітної системи : монографія. – Кременчук : ПП Щербатих О. В. 2013. – 320 с.
- [14] Родькин Д. И., Ченчевой В. В., Огарь В. А. Природа аномальных потерь в стали в режиме глубокого насыщения. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. № 1. – 76-93 с.
- [15] Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах : учеб. пособие для вузов. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
- [16] Преобразователи частоты полупроводниковые. Общие технические требования. [Электронный ресурс] / Официальный веб-портал ГОСТ 24607–88. Режим доступа: <http://introkub.ru/6/GOST-24607-88-Preobrazovateli-chastoty-poluprovodnikovyye-Obshchiye-tekhicheskiye-trebovaniya.php>
- [17] Хребтова О. А. Гладир А. І. Модернізація електропривода механізму підйому затвору зливної греблі в умовах Кременчуцької ГЕС. Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 4, част. 2. С. 59–63.
- [18] Электроприводы регулируемые асинхронные для объектов энергетики [Электронный ресурс] / Офіційний веб-портал ГОСТ Р 51137-98. Режим доступа : http://valvolodin.narod.ru/gost/gost_r_51137-98.pdf
- [19] Калинов А. П., Мамчур Д. Г., Гладырь А. И. Учебно исследовательское оборудование на базе универсальных модулей АЦП. [Электронный ресурс] / Офіційний веб-портал ПиКАД : Промышленные измерения контроль автоматизация диагностика 4/2008 Режим доступа : <http://www.picad.com.ua/0408/pdf/vnedr4.pdf>
- [20] Петрушин В. С., Якимец А. М. Анализ переходных процессов в АД при частотно-токовом управлении. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003. – № 2. Том 1. С. 49–52

Стаття надійшла до редакції 10.08.2020

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ТРОГАНИИ ПОД НАГРУЗКОЙ

ХРЕБТОВА О.А. канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: 34092@ukr.net;

ЗАЧЕПА Н.В. канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

Цель работы. Проведение экспериментальных исследований температурных режимов асинхронного двигателя при трогании на лабораторном комплексе. Получение реальных характеристик процесса нагрева при выполнении трогания, оценка его влияние на состояние изоляции асинхронного двигателя, подтверждение адекватности косвенного метода определения температуры нагрева обмоток асинхронного двигателя при формировании циклического пускового момента в процессе трогания.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовалось математическое моделирование с впервые полученными математическими выражениями что рассчитывают температуры обмотки статора во время трогания с учетом влияния частоты напряжения питания на параметры асинхронного двигателя. Физическое моделирование на разработанном лабораторном стенде режимов трогания с фиксирования температуры во время каждого этапа эксперимента для подтверждения теоретических исследований трогания при импульсном характере пускового момента.

Полученные результаты. Применение различных методов построения эквивалентных тепловых схем (ЕТС) для расчета температурных режимов асинхронного двигателя требует значительных ресурсозатрат, что является нерентабельным, когда ротор машины неподвижен как в случае трогания. С использованием метода определения потерь в стали в режиме глубокого насыщения выведены математические зависимости расчета температурного режима во время выполнения алгоритма, учитывающий изменение свойств обмотки статора во время нагревания, рассчитаны допустимые параметры перегрузки по току с учетом допустимого нагрева обмоток статора. В работе получены математические зависимости для расчета температурных режимов обмоток статора при формировании циклического пускового момента для выполнения трогания, учитывающие изменение начальных условий трогания для каждого цикла и изменение свойств обмоток статора во время нагревания. Разработан лабораторный комплекс позволяет проводить исследования температурных режимов обмотки статора при трогании асинхронного двигателя с заторможенным ротором, при задании различных значений амплитуды и частоты напряжения питания. Результаты исследований показывают, что математические зависимости, выведенные в работе позволяют обеспечить контроль температуры нагрева аналитическим методом. Анализ режимов работы асинхронного двигателя при исполнении трогания подтвердил необходимость контроля температурных показателей обмоток статора для предотвращения возникновения аварийных ситуаций. В целом при трогании с применением пошаговой подачи напряжения питания пониженной частоты для получения повышенного пускового момента, нагрев обмоток статора происходит медленнее по сравнению с нагревом при длительном режиме работы асинхронного двигателя с заторможенным ротором позволяет выполнять многократные попытки трогания на пониженной частоте с большой амплитудой напряжения питания.

Научная новизна. Впервые получены и экспериментально подтверждены математические зависимости для расчета температуры обмоток статора во время трогания с заторможенным ротором асинхронной машины, учитывающие изменение свойств обмотки статора во время нагревания и влияние частоты питающего напряжения.

Практическая ценность. Впервые предлагается косвенный метод контроля температуры нагрева обмоток статора асинхронной машины при трогании для предотвращения возникновения аварийных ситуаций на технологическом оборудовании, что пускается под нагрузкой.

Ключевые слова: обмотки статора асинхронной машины; температурный режим; параметры асинхронной машины; частоты напряжения питания; экспериментальный комплекс.

THERMAL MODES OF THE AUTOMATED ELECTRIC DRIVE SYSTEM DURING BURNING UNDER LOAD

KHREBTOVA O.A. Ph.D, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: 34092@ukr.net;

ZACHEPA N.V. Ph.D, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

Purpose. Conducting experimental studies of temperature regimes of an induction motor during start-up on a laboratory complex. Obtaining real characteristics of the heating process during the start of the start, assessing its impact on the insulation state of the induction motor, confirming the adequacy of the indirect method of determining the heating temperature of the induction motor windings during the formation of the cyclic starting torque during the start.

Methodology. To solve these problems, we used mathematical modeling based on the first mathematical expressions that calculate the temperature of the stator winding during start-up, taking into account the influence of the frequency of the supply voltage on the parameters of the induction motor. Physical modeling on the developed laboratory stand of modes of movement on fixing of temperature during each stage of experiment for confirmation of theoretical researches of movement at pulse character of the starting moment.

Findings. The use of different methods of constructing equivalent thermal circuits (ETS) to calculate the temperature of an induction motor requires significant resource consumption, which is unprofitable when the rotor of the machine is stationary as in the case of failure. Using the method of determining losses in steel in the deep saturation mode, the mathematical dependences of the calculation of the temperature regime during the algorithm, taking into account the change in the properties of the stator winding during heating, calculated the allowable current overload parameters taking into account the allowable heating of stator windings. The paper obtains mathematical dependences for calculating the temperature regimes of the stator windings during the formation of the cyclic starting torque for the movement, taking into account the change of the initial conditions of the movement for each cycle and the change in the properties of the stator windings during heating. The developed laboratory complex allows to carry out research of temperature modes of a stator winding at movement of the induction motor with the braked rotor, at assignment of various values of amplitude and frequency of supply voltage. The results of research indicate that the mathematical dependences derived in the work allow to control the heating temperature by the analytical method. Analysis of the modes of operation of the induction motor during the execution of the movement confirmed the need to control the temperature of the stator windings to prevent accidents. In general, when starting with a step-by-step supply of low frequency supply voltage to obtain increased starting torque, the heating of the stator windings is slower compared to heating during prolonged operation of an induction motor with a braked rotor, which allows multiple attempts to move at low frequency. nutrition.

Originality. For the first time, mathematical dependences for calculating the temperature of stator windings during start-up with a braked rotor of an asynchronous machine are obtained and experimentally confirmed, which take into account the change in stator winding properties during heating and the influence of supply voltage frequency.

Practical value. For the first time, an indirect method of controlling the heating temperature of the stator windings of an asynchronous machine during start-up is proposed to prevent emergencies on process equipment that is started under load.

Keywords stator windings of asynchronous machine; temperature regime; parameters of the asynchronous machine; supply voltage frequency; experimental complex.

REFERENCES

- [1] Khrebtova O.A., Sergienko S.A. (2012) Investigation of the properties of the electric drive system of the shutter dam lifting mechanism *Electromechanical and energy saving systems. Thematic issue "Problems of automated electric drive. Theory and Practice" of scientific and production magazine*. 3(19). - 660. (in Russian)
- [2] Klepikov V.B. (2014) Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: a monograph. H.: Publishing house "Textbooks of NTU" KhPI ". 408 p. (in Russian)
- [3] Chenchevoi V., Zagirnyak M., Ogar V. Analysis of induction motors features taking into account change of iron properties. *Acta Technica*. Iss. 59/2014 (1). RR. 25–47. ISSN 0001–7043.
- [4] Khrebtova O.A., Chenchevoi V. V., Ogar V. O., (2013) Determination of the moment of the asynchronous engine at starting *Electromechanical and energy-saving systems: quarterly scientific-production journal*. 4. 106. (in Russian)

- [5] Balik J., Lukac P. (1998). On the kinetics of dynamic strain aging. *Kovove Mater*, Vol. 36. No. 1. P. 3–9.
- [6] Syromyatnikov I.A. (1984). Modes of operation of asynchronous and synchronous motors. Moscow, Energoatomizdat. 240. (in Russian)
- [7] Mikhalev M.A., Mikhaleva I.M. (1977) Fundamentals of heat transfer. Moscow, Energy. 342 p.
- [8] Review of thermal calculation methods and existing models. [Electronic resource] / Official web : http://www.physic-explorer.ru/obzor_metodov_teplovogo_rascheta_i_sushchestvuyushchih_modelей-441-1.html
- [9] Eliseeva E.A., Shinyansky A.V. (1983) Handbook of automated electric drive. Moscow, Higher school, 616. (in Russian)
- [10] Gurevich E. I., Rybin Yu. L. (1983) Transients in electric machines. L.: Energoatomizdat. 316. (in Russian)
- [11] Nosach E.V., Cherny A.P., Vorobeychik O.S. (2011) Processes of heating windings during starting of electric machines. *Electromechanical and energy-saving systems: quarterly scientific and production journal*. 1. p. 75–79. (in Russian)
- [12] Shidlovskaya N.A. (2002) Nonlinear circuits with heat loss. K.: Scientific opinion. 160. (in Ukrainian)
- [13] Ogar V.O., Rodkin D.I. (2013) Characteristics of induction motors taking into account the nonlinear properties of the magnetic system: a monograph. Kremenchuk: PP Shcherbatykh OV. 320. (in Ukrainian).
- [14] Rodkin D.I., Chenchewa V.V., Ogar V.A. (2014) The nature of anomalous losses in steel in the deep saturation mode *Electromechanical and energy saving systems*. 3. 106. (in Russian)
- [15] Filippov I.F. (1986) Heat transfer in electric machines: textbook. manual for universities. L.: Energoatomizdat. 256. (in Russian)
- [16] GOST 24607–88 Semiconductor frequency converters. [Electronic resource] / General technical requirements. : <http://introkub.ru/6/GOST-24607-88-Preobrazovateli-chastoty-poluprovodnikovyye-Obshchiye-tekhicheskiye-trebovaniya.php>
- [17] Khrebtova O.A., Gladyr A.I. (2010) Modernization of the electric drive of the shutter dam lifting mechanism in the conditions of Kremenchug HPP *Bulletin of Kremenchug State University named after Mikhail Ostrogradsky*. 4, pp. 59–63. (in Ukrainian)
- [18] Electric drives adjustable asynchronous for energy facilities [Electronic resource] / Official web-portal GOST R 51137-98 Access mode: http://valvolodin.narod.ru/gost/gost_r_51137-98.pdf
- [19] Kalinov A.P., Mamchur D.G., Gladyr A.I. Training and research equipment based on universal ADC modules. [Electronic resource] / Official web-portal of PICAD: Industrial measurements control automation diagnostics 4/2008 Access mode: <http://www.picad.com.ua/0408/pdf/vnedr4.pdf>
- [20] Petrushin V.S., Yakimets A.M. (2003) Analysis of transients in BP under frequency-current control *Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University*. 2. Volume 1. p 49–52. (in Russian)

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД З БЕЗДРОТОВИМ ІНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

- КУЛИНИЧ Е.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kuliniched@gmail.com;
- НАЗАРОВА О.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: nazarova16@gmail.com
- ГОНЧАРОВ Д.В. магістр кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: nicksonszp@gmail.com
- ЧЕРНИШЕВ С.Г. магістр кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: flashboy811@gmail.com
- ПІСКУН В.В. студент групи Е-317 кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: vlad.piskun.2000@gmail.com

Мета роботи. Розробка лабораторного стенду з бездротовим інтерфейсом для вивчення та дослідження систем автоматичного керування електроприводами постійного струму.

Методи дослідження. Фізичний експеримент на розробленому лабораторному стенді, комп'ютерне моделювання, розрахунково-аналітичний.

Отримані результати. В ході дослідження було розглянуто та проаналізовано переваги та недоліки існуючих розробок лабораторних стендів з віртуальною та дистанційною складовою, можливістю організації бездротового інтерфейсу, з урахуванням економічності, мобільності, надійності і простоти виконання, а також можливості використання як навчального стенду. Розроблено підключення стенду за допомогою USB та Wi-Fi. Для силового комутатора та системи автоматичного керування використано мікроконтролер STM32F103C8T6. Інтерфейсна частина складається з плати NodeMCU, модуля MicroSD карти, блоку керування інтерфейсом, LCD 16x2 з I2C розширювачем. Передбачено можливість поточної дистанційної передачі інформації про режими та параметри роботи двигуна до комп'ютера з виводом на браузер через модуль Wi-Fi ESP8266MOD. Розроблено замкнену систему автоматичного керування двигуном постійного струму з ПІД-регуляторами струму та ЕРС. Було проведено експерименти з імпульсним та плавним збільшенням швидкості двигуна та варіюванням складових ПІД-регуляторів за допомогою пульта керування. Всі графіки результатів експерименту були отримані на веб-сторінці з фіксованою IP-адресою в браузері через Wi-Fi.

Наукова новизна. Запропоновано та розроблено структуру системи дистанційного моніторингу та керування на основі апаратно-програмного суміщення телекомунікаційної та вимірювальної систем, яка відрізняється від існуючих наявністю поточної бездротової передачі інформації, що дозволяє дистанційно отримувати дані досліджень систем автоматичного керування двигуном постійного струму.

Практична цінність. Розроблений лабораторний стенд з бездротовим інтерфейсом дозволяє дистанційно отримувати і зберігати експериментальні дані про параметри досліджуваного двигуна у режимі реального часу.

Ключові слова: лабораторний стенд; бездротовий інтерфейс; мікроконтролер; система автоматичного керування; електропривод; постійний струм.

І. ВСТУП

Наявність сучасних лабораторних стендів та апаратних засобів навчання є запорукою якісного викладання технічних дисциплін та отримання студентами практичних навичок роботи з обладнанням, що іде в ногу із часом. Використання у навчальному процесі реального дослідницького обладнання сприяє підготовці не тільки освічених фахівців, але й людей, які

здатні творчо мислити, швидко реагувати на певні нестандартні ситуації, вони постійно удосконалюють свої знання і використовують їх у практичній діяльності.

Стрімкий розвиток сучасної обчислювальної техніки, цифрових комунікацій, робототехніки та інформаційних технологій сприяє впровадженню мікропроцесорної техніки, цифрових приладів з дискретною формою подання сигналу у різноманітні елект-

ромеханічні системи [1]-[3], що покращує їх технічні характеристики, зменшує енергоспоживання, габаритні розміри, підвищує надійність, швидкість обробки та передачі даних.

Однією з нових технологій є технологія поєднання віртуальних і дистанційних приладів, яка дозволяє створювати системи вимірювання, дослідження та керування з можливістю дистанційного підключення. Особливістю такої технології є те, що частина приладів та систем реалізується на основі приладів введення-виведення аналогових та цифрових сигналів, а функціональна і користувацький інтерфейс – програмно. Разом з цим можуть вирішуватися питання обробки інформації і представлення результатів у певному вигляді, а також можливість моніторингу і діагностування обладнання.

Зважаючи на складну ситуацію у світі із захворюваністю COVID-19 [4], більшість навчальних закладів було вимушено впровадити у повному або змішаному форматі дистанційну форму навчання, що вплинуло на можливість студентів у повній мірі скористатися лабораторними засобами, які задіяні у навчальному процесі. Тому розробка і впровадження бездротових і дистанційних технологій розширить можливості здобувати якісні знання для студентів.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Досвід розробки спеціалізованих лабораторних стендів та лабораторних комплексів з використанням віртуальної частини [5,6] та дистанційної, бездротової передачі даних досить поширений. Відомі розробки лабораторних стендів для вивчення протоколів промислових мереж ModBUS, ProfiNET та EtherCAT на базі одноплатного мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3. Розглядаються можливості інтеграції Інтернету речей (IoT), що розвивається в сучасному світі, в протоколи промислових систем керування [7].

Одним із підходів у організації віддалених лабораторій є розподілена архітектура, за допомогою якої формуються різні рівні доступу до виконання різних функцій для студентів та викладачів [8]. До структур лабораторних стендів включають моделювання етапів виробничого процесу, що проводиться на різних робочих станціях, та окремі типи продукції [9]. Розглянуто та висвітлено сильні та слабкі сторони різних підходів до лабораторних досліджень у галузі електротехніки, спираючись на існуючі стандарти освіти, орієнтації на сприйняття європейського обладнання студентами [10]. Віддалені лабораторії дозволяють віддалений доступ викладачів та студентів для здійснення дидактичного досвіду управління процесами на експериментальних платформах, наприклад, підключення реального обладнання до Matlab/Simulink та Moodle. Зв'язок з Moodle дозволяє викладачам та студентам отримати віддалений доступ до лабораторії, використовуючи їхні повноваження як студента / викладача звичайного курсу [11]. Віддалені лабораторії дозволяють взаємодіяти з реальним обладнанням че-

рез віддалений доступ [12], [13] і оперувати великим обсягом різноманітної інформації, що складається з етапів концептуального логічного і фізичного моделювання [14]. Для задоволення сучасних вимог енергетичних компаній важливо постійно вдосконалювати функціональність систем моніторингу промислового обладнання. Що стало однією з причин створення лабораторного стенду для ознайомлення студентів з системою моніторингу трансформаторів під час занять з автоматизації енергосистеми [15]. Функції лабораторних стендів розширюються шляхом доповнення функціями тестування алгоритмів керування [16], можливостями варіювання конфігурації компонентів схем, вимірювальних пристроїв [17], оснащенням автоматизованою системою контролю за виконанням лабораторних робіт [18], [19].

Отже, ідея створення лабораторного стенду з віртуальною частиною, бездротовим інтерфейсом для вивчення та дослідження режимів електропривода постійного струму є актуальною, участь у розробці стенду студентів сприяє формуванню у них творчої складової, здатності аналізувати отримані результати, приймати рішення у нестандартних ситуаціях, що підвищує рівень їх теоретичної і практичної підготовки. Це, у свою чергу, відкриває нові шляхи та підходи до вирішення завдань підвищення якості підготовки студентів.

III. МЕТА РОБОТИ

Розглянути та проаналізувати переваги та недоліки існуючих розробок за досліджуваною тематикою з урахуванням економічності, мобільності, надійності і простоти виконання, а також можливості використання як навчального стенду. Розробити альтернативні варіанти підключення стенду за допомогою USB та Wi-Fi, силовий комутатор, давачі для розробки замкненої системи автоматичного керування швидкістю ДПС. Передбачити можливість поточної дистанційної передачі інформації про режими та параметри роботи двигуна до комп'ютера з виводом на браузер.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Двигуни постійного струму знайшли застосування в багатьох галузях промисловості, вивчаються у більшості освітніх програм галузі «Електрична інженерія», а також спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», тому виникає необхідність у вивченні та дослідженні систем автоматичного керування (САК) двигуном постійного струму (ДПС) зі зворотним зв'язком з урахуванням сучасних ІТ-технологій передачі та обробки даних.

Для виготовлення стенду (рис. 1) було використано електромеханічну частину шуруповерта фірми Powertec pt 3104\1, яка має такі характеристики електродвигун - 230В ~ 50/60 Гц, напруга живлення – 12 В DC, швидкість - 0-550 об/хв, акумулятор – 12 В/1200 мАч. За допомогою RLC тестера MG328

було визначені опір якоря двигуна ($R_a = 6 \text{ Ом}$) та індуктивність обмотки якоря ($L_a = 0,5 \text{ мГн}$).

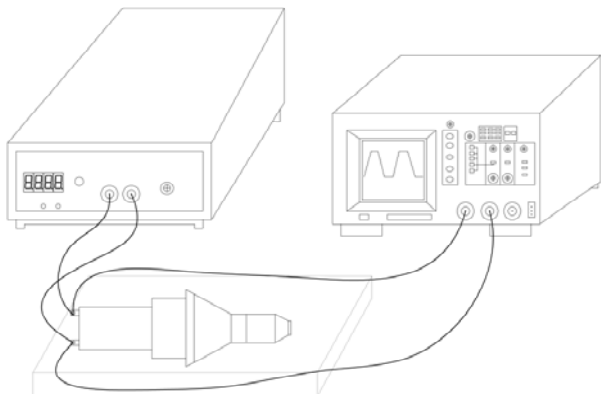


Рисунок 1. Зовнішній вигляд стенду

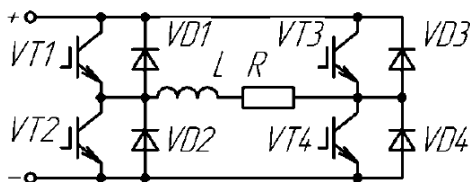


Рисунок 2. Схема реверсивного широтно-імпульсного перетворювача за мостовою схемою

Для живлення стенду використано лабораторне джерело постійного струму, розроблено силовий комутатор (DC-DC перетворювач) [20] побудований за схемою реверсивного широтно-імпульсного перетворювача з мостовою схемою, яка називається Н-подібною схемою (рис. 2). Вона відповідає наступним критеріям: високий ККД, за рахунок малих втрат; можливість реверсивного руху; можливість керування ШІМ сигналом. В якості силових елементів використано MOSTFET транзистори.

Для реалізації зворотного зв'язку за струмом вибрано датчик струму, який має ефект Холла і невеликий розмір - TMCS1100 від Texas Instruments.

Розроблено електричну принципову схему [21], шаблон для виготовлення друкованої плати, 3D модель друкованої з поверхневим монтажем за допомогою програми EasyEDA (крос-платформа веб-орієнтоване середовище автоматизації проектування електроніки, включає в себе редактор принципових схем, редактор топології друкованих плат, SPICE-симулятор, хмарне сховище даних, систему керування проектами, а також функцію замовлення і виготовлення друкованих плат), виготовлено плату силового комутатора (рис. 3).

Функціональна схема представлена на рисунку 4 [22]. Головним елементом стенду є мікроконтролер, він обслуговує обробку і обмін інформацією, яка поступає від елементів схеми. Для живлення системи використовується джерело постійної напруги 12 В на

базі лабораторного блока живлення з регульованою напругою до 40 В та струмом до 8 А. Для живлення мікроконтролера і пульта налагодження ПІД-регулятора маємо два перетворювача постійної напруги 12 В в постійну 5 В, так як робоча напруга мікроконтролера і пульта становить 5 В. Силова схема (комутатор) на основі польових транзисторів MOSFET, які приймають сигнал керування ШІМ від мікроконтролера і подають напругу на ДПС. Від двигуна постійного струму надходить зворотній зв'язок за ЕРС до АЦП процесора.

Пульт керування призначений для керування пуском, реверсом та зупинкою двигуна за допомогою трьох кнопок (ЛІВОРУЧ, ЗУПИНКА, ПРАВОРУЧ), також для регулювання швидкості призначений потенціометр (ШВИДКІСТЬ).

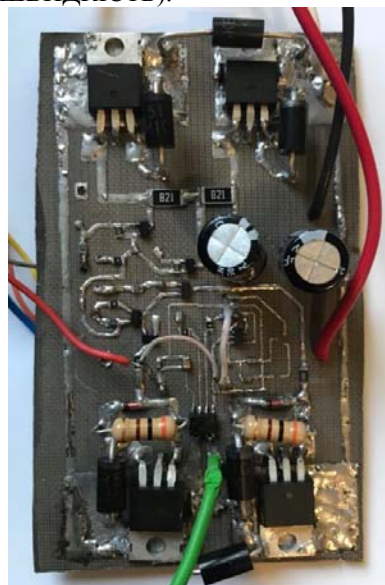


Рисунок 3. Виготовлена плата силового комутатора

Метою розробки оперативної схеми були такі критерії: використати найменшу кількість ніжок мікроконтролера, для подальшого удосконалення проекту, наприклад, підключення додаткових модулів; захистити мікроконтролер, в разі пробією силових транзисторів, враховуючи навантажувальну здатність ніжки не більше 20 мА; досягти високої частоти керування, оскільки людське вухо сприймає шум на частотах від 16 Гц до 20 КГц, для більш комфортного користування було завдання забезпечити частоту понад 20 КГц.

Для керування польовими транзисторами існують спеціалізовані драйвери, але в цілях економії оперативна схема була побудована на простих малопотужних польових транзисторах. Оскільки польові транзистори мають ізольований затвор, це оберігає мікроконтролер в разі пробією силових транзисторів. Також це дозволило підняти напругу на затворах силових транзисторів, оскільки для керування силовими транзисторами необхідна напруга 10-18 В, а напруга на ніжці мікроконтролера становить 5 В. Для малопо-

тужних польових транзисторів струмового електричного навантаження на ніжки мікроконтролера в 20 мА достатньо.

Електричні схеми були спроектовані і розраховані в LTspice (SwitcherCAD), який являє собою універсальну середу для проектування і створення електричних схем з інтегрованим симулятором змішаного моделювання. Модель схеми керування двигуном постійного струму з реверсивним обертанням показано на рис. 5, де G1 – джерело живлення на 12 В; VT1, 2 – силові польові транзистори, N-канал з ізольованим затвором; VT3, 4 – силові польові транзистори, P-канал з ізольованим затвором; VT5-9 – керуючі малопотужні транзистори з ізольованим затвором; G2, 3 – виконують роль ніжок мікроконтролера, задають логічні рівні; G4 – ніжка мікроконтролера формує PWM, (широтно-імпульсну модуляцію); G5, L1, C1, R8 – виконують роль еквівалентного заміщення двигуна постійного струму; D1-4 – допоміжні діоди Шотки; R1-7 – резистори.

Розроблена схема дозволяє використовувати всього три ніжки мікроконтролера для керування двигуном в реверсивному режимі. Дві ніжки логічних рівнів G2 і G3 відповідають за напрямок обертання двигуна, і одна G4 задає ШІМ сигнал. Також підтримується можливість примусового гальмування двигуна.

Як видно з графіків, середній струм в керуючому транзисторі не великий близько 38 мА. Але кидки в момент включення (для заряду ємності силового транзистора) досягають 1,4 А.

Моделювання схеми ілюструє, що найбільша напруга на стоці-витоку керуючого транзистора досягається на вимкненому транзисторі в момент роботи схеми, та дорівнює напрузі джерела живлення $G1 = V_{dss} = 12$ В. Результати приведені на рисунках 6 та 7.

Напруга на затворі транзистора надходить з мікроконтролера і дорівнює 5 В. Чим менше ємність на затворі, тим менше струму необхідно для включення і відключення транзистора. Рисунок 8 ілюструє перебіг струму на ніжці контролера. Амплітудне значення досягає 70 мА, поточне – 1,8 мА. Керуюча частина включає в себе мікроконтролер STM32F103C8T6, а інтерфейсна частина складається з плати NodeMCU (Wi-Fi модуля), модуля MicroSD карти, блоку керування інтерфейсом, LCD 16x2 та I2C перетворювача.

Інтернет речей є однією з найбільш популярних областей в світі технологій. Фізичні об'єкти і цифровий світ пов'язані зараз як ніколи. Пам'ятаючи про це, компанія Espressif Systems випустила мікроконтролер з підтримкою Wi-Fi, ESP8266. За допомогою якого можна контролювати і керувати пристроєм з будь-якої точки світу, де є вихід до інтернету. На платі встановлено контролер USB-UART на основі мікросхеми CH340, який перетворює USB-сигнал на послідовний і дозволяє комп'ютеру програмувати та взаємодіяти з мікросхемою ESP8266. Крім того, ESP8266 містить вбудований приймач Wi-Fi 802.11b / g / n HT40, тому він може не тільки підключатися до мережі Wi-Fi і взаємодіяти з інтернетом, а й встановлювати власну мережу, дозволяючи іншим пристроям підключатися безпосередньо до нього.

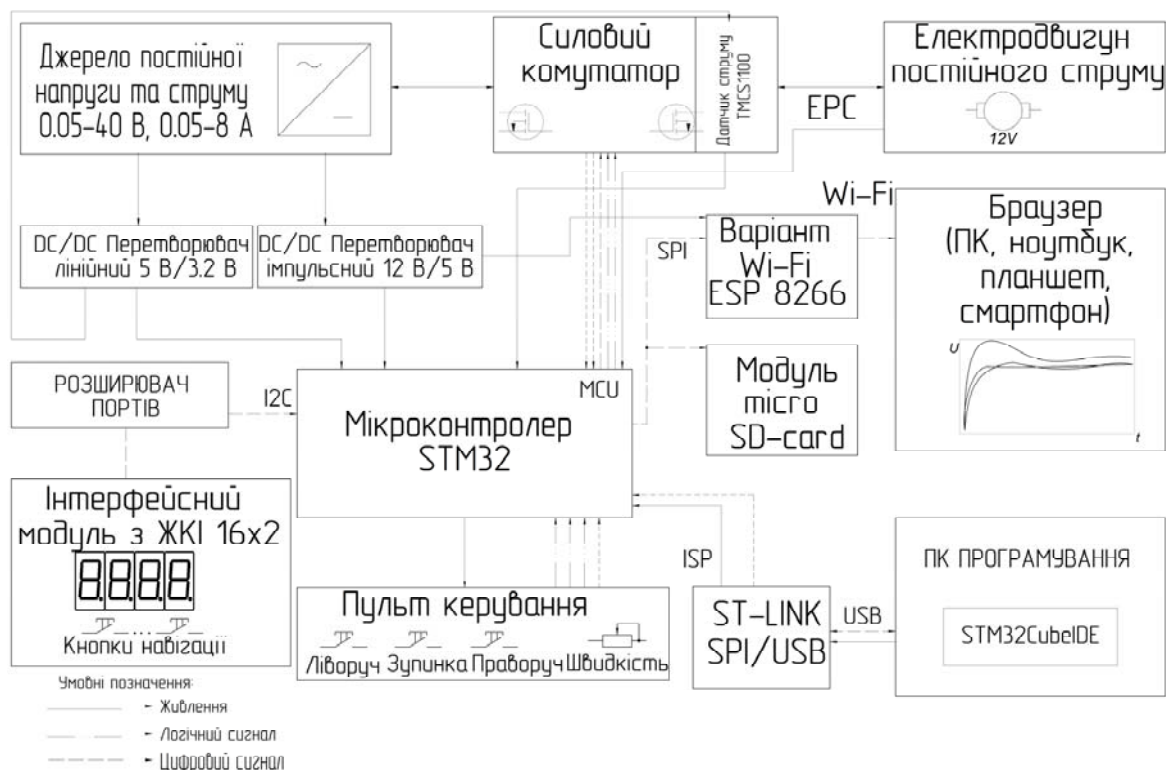


Рисунок 4. Схема електрична функціональна лабораторного стенду

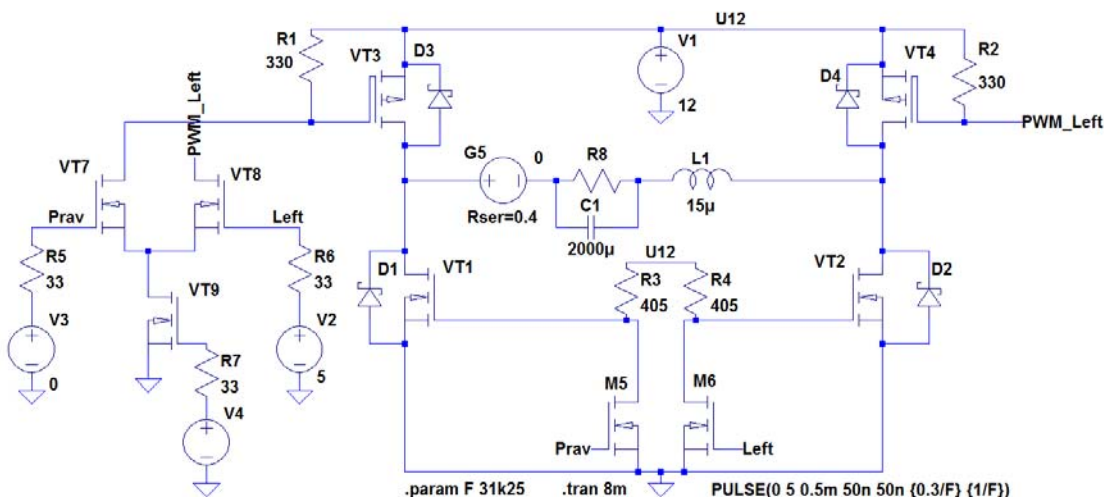


Рисунок 5. Модель схеми керування двигуном постійного струму з реверсивним обертанням

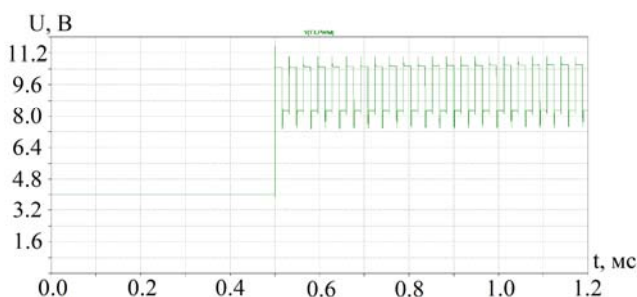


Рисунок 6. Напруга стоку-витоку керуючого транзистора.

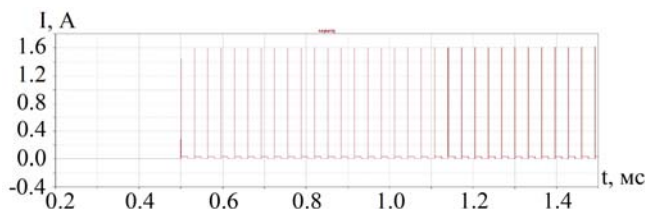


Рисунок 7. Струм стоку-витоку керуючого транзистора.

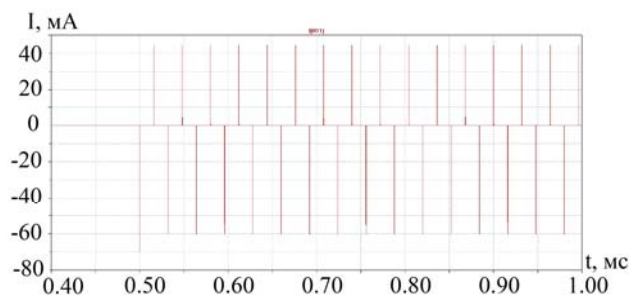


Рисунок 8. Протікання струму з ніжки мікроконтролера при ШІМ 50%.

Оскільки діапазон робочої напруги ESP8266 становить від 3 В до 3,6 В, плата поставляється з регулятором напруги, який підтримує постійну напругу на

рівні 3,3 В. Для програмування ESP8266 було обрано Arduino IDE.

Для того щоб зменшити кількість зайнятих портів на мікроконтролері STM32F103C8T6 було прийнято рішення встановити мікросхему PCF8574AT. Спеціально для дисплея, є модуль-перехідник на основі мікросхеми PCF8574AT, яка призначена для розширення кількості ліній введення/виведення. Мікросхема підключається по I2C інтерфейсу і надає розширення розміром у порт з 8 ліній введення/виведення.

При включенні стенду на мікроконтролерах STM32F103C8T6 та ESP8266 проводиться ініціалізація і налаштування всіх необхідних апаратних ресурсів, а також входів-виходів та встановлення необхідних змінних. Загальний алгоритм зображено на рисунку 9.

Далі виконуються по відповідним запитам переривання такі процеси як, обслуговування панелі керування приводом, інтерфейсної панелі та роботи Wi-Fi модуля. Керування двигуном виконується за допомогою панелі з органами прямого керування приводом. Якщо є натискання будь-якої кнопки з панелі керування, то виконується операція в залежності від призначення кнопки. Потім відповідні сигнали подаються через мікропроцесор на блок керування двигуном, згідно структурної схеми системи керування, яка отримує данні зі зворотних зв'язків по ЕРС та по струму. В залежності від завдання по швидкості та коефіцієнтів ПІД-регуляторів змінюється ШІМ живлення двигуна.

Регулювання ПІД складових виконується з інтерфейсної панелі. Якщо є натискання кнопок навігації інтерфейсної панелі, то відповідно від кнопки виконуємо перехід на наступне меню або на наступний рядок поточного меню.

Спочатку виконується ініціалізація панелі керування приводом, тобто виконується налаштування

обраних портів мікроконтролера на отримання даних від кнопок. Далі очікується натискання кнопок керування. В залежності від кнопки, виконується переривання з наступними операціями. Алгоритм керування двигуном зображено на рисунку 10.

Перший пріоритет має кнопка «Стоп». При її натисканні зупиняється формування ШІМ сигналу та знімається завдання керування приводом. Другий пріоритет має кнопка «Вперед». При натисканні встановлюється завдання на ввімкнення двигуна в напрямку по часовій стрілці зі швидкістю, яку встановили за допомогою потенціометра, який регулює завдання по швидкості. Третій пріоритет має кнопка «Назад». При натисканні встановлюється завдання на ввімкнення двигуна в напрямку проти часової стрілки зі швидкістю, яку встановили за допомогою потенціометра.

З боку Wi-Fi модуля спочатку виконується його ініціалізація, тобто налаштування IP, MAC, DNS адресів, назви мережі та частоти оновлення сервера.

Після налаштування Wi-Fi модуля, відбувається ініціалізація модуля microSD картки, налаштування зовнішнього вигляду веб-сторінки, перевірки всіх директорій, в яких знаходяться необхідні документи. Потім виконується перевірка запитів на зв'язок з користувачем, де використовується зациклення на очікування запиту. Якщо є запит, то зчитується масив інформації з microSD картки, та формується вміст сторінки. Далі відбувається перевірка на закінчення

масиву даних, якщо перевірка не пройшла успішно, то відбувається повернення до зчитування масиву інформації з microSD картки. Якщо перевірка пройшла успішно, то закривається передача даних і зберігається інформація. Потім виконується обробка даних та передача їх по запиту. Далі відбувається перевірка з'єднання з користувачем, якщо користувач ще присутній, то відбувається повернення до зчитування масиву інформації з microSD картки. Якщо користувача вже немає, то завершується передачу даних. Алгоритм інтерфейсу зв'язку стенду з комп'ютером показано на рисунку 11 у вигляді блок схеми.

На останньому варіанті системи в якості Wi-Fi модуля була задіяна плата NodeMCU, яка оснащена модулем ESP-12E з антеною 2,4 ГГц. У цій платі використовується функція мультиплексування портів - це означає, що один вивід GPIO може діяти як ШІМ/UART/SPI. NodeMCU має в цілому 17 портів GPIO, виведених на роз'єми з обох сторін плати. Ці порти можуть використовуватися для виконання різних периферійних завдань. На платі встановлено контролер USB-UART на основі мікросхеми CH340, який перетворює USB-сигнал на послідовний і дозволяє комп'ютеру програмувати та взаємодіяти з мікросхемою ESP-12E. STM 32 CubeIDE це універсальний інструмент розробки для декількох ОС, який є частиною програмної екосистеми STM 32 Cube MX.

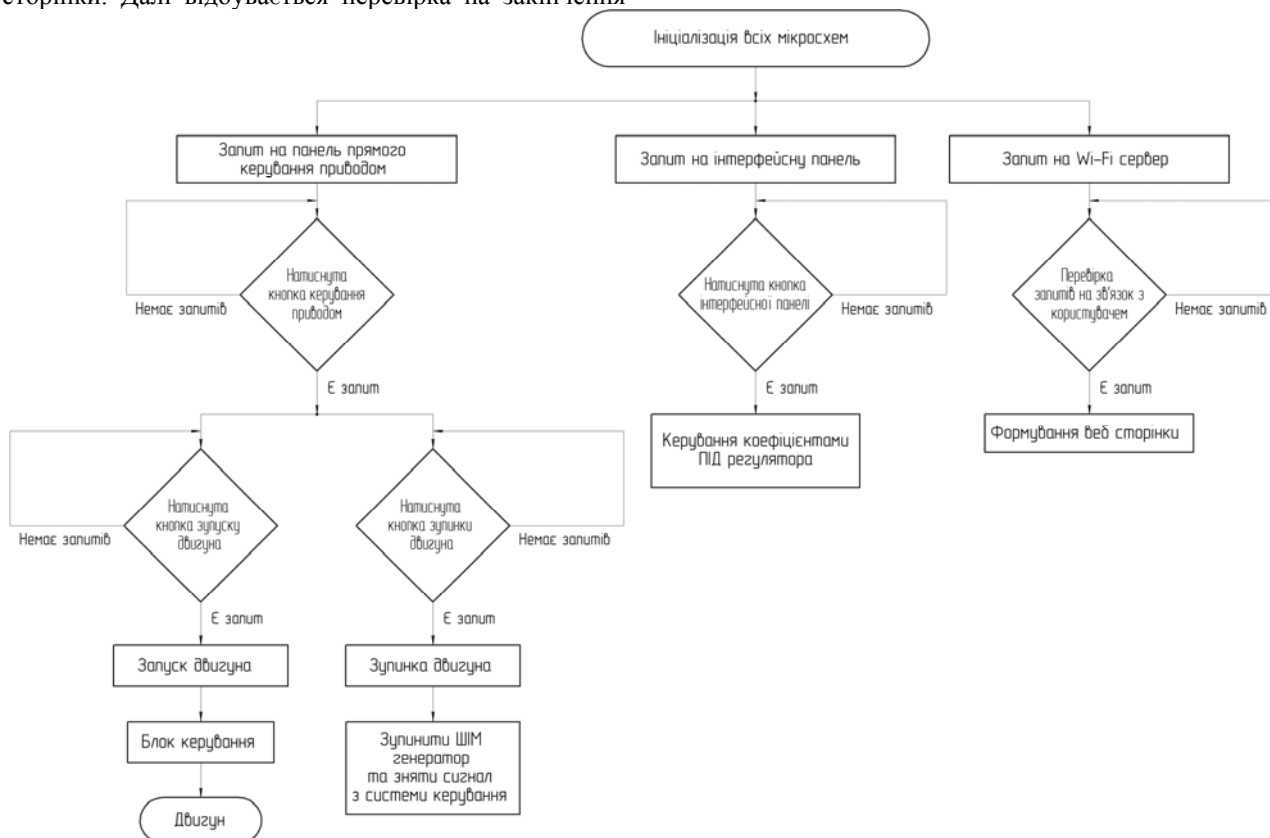


Рисунок 9. Загальний алгоритм роботи стенду

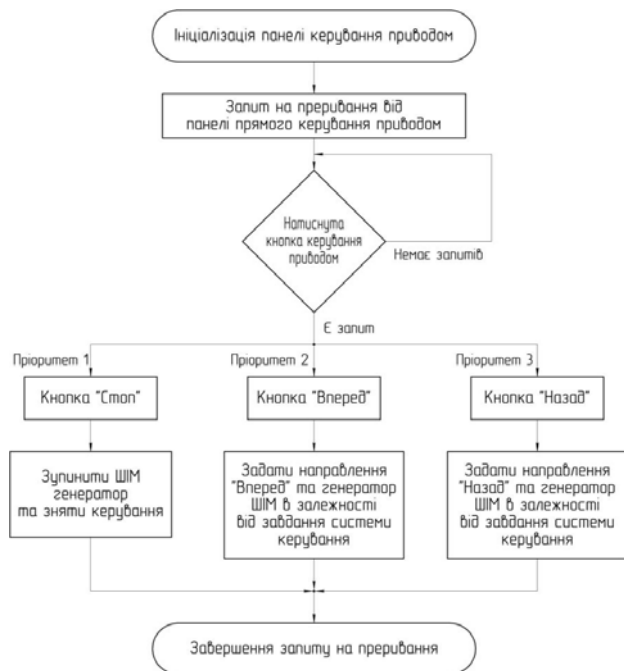


Рисунок 10. Алгоритм керування двигуном

Вдосконалена платформа для розробки на мовах C/C++ з периферійною конфігурацією, генерацією коду, компіляцією коду та функціями налагодження для мікроконтролерів STM 32. Модуль LCD Keypad Shield 1602 є платою з вбудованими модулями індикації і керування. Індикація здійснюється за допомогою LCD дисплея HD 44780, а керування через вбудовані кнопки. Щоб підключити дисплей до мікроконтролера можна використовувати всі лінії введення/виведення, тобто через 8 бітний інтерфейс, але для цього буде потрібна значна кількість портів мікроконтролера. Можна скоротити кількість портів, якщо переключитися на 4 бітний інтерфейс. У цьому випадку 1 байт даних передається за два тактових імпульси, спочатку старші 4 біти, а потім молодші.

Для роботи з екраном використовуються кнопки, які вмонтовані в модуль. В стандартному модулі 5 кнопок для визначення натискання вони підключені до аналогового піну A0, а кнопка RST має свій окремий пін. Для того, щоб мінімізувати кількість зайнятих портів на мікроконтролері та збільшити функціонал аналогового піну A0, до 6 кнопок, було додатково встановлено резистор на 1 кОм між контактами кнопок RST та SELECT. Модуль перехідник. Для того щоб зменшити кількість зайнятих портів на мікроконтролері STM32F103C8T6 було прийнято рішення встановити мікросхему PCF8574AT. Спеціально для дисплея є модуль перехідник на основі мікросхеми PCF8574AT, яка призначена для розширення кількості ліній введення/виведення. Мікросхема підключається по I2C інтерфейсу і має порт з 8 ліній введення/виведення. Принцип функціонування простий, при записі байту даних в мікросхему, лінії порту приймають рівні, що відповідають значенням бітів отримано-

го байту Операція читання повертає байт даних, біти якого вказують стан ліній порту

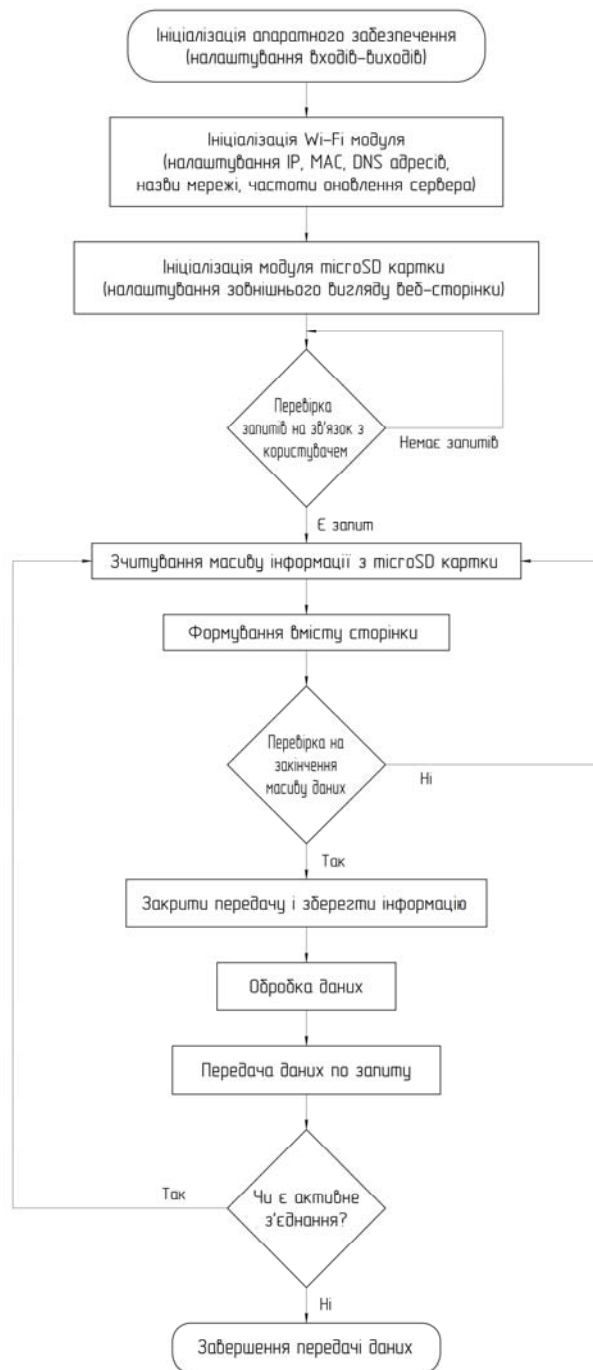


Рисунок 11. Алгоритм інтерфейсу зв'язку стенду з комп'ютером

Таким чином, мікросхема дозволяє розширити кількість ліній введення/виведення, використовуючи два біта керуючого порту.

Система живлення. В кінцевому варіанті стенду замість лабораторного блоку для його живлення використовується імпульсний блок на 12 В постійної напруги і максимальним струмом 10 А. Для ввімк-

нення плати NodeMCU, дисплея, I2C перетворювача, блоку керування інтерфейсом, модуля MicroSD карти необхідна напруга 5 В. Цю напругу ми отримуємо шляхом перетворення 12 В до 5 В за допомогою понижуючого перетворювача на мікросхемі LM2596S. Для стабільної роботи мікроконтролера STM32F103C8T6 та для живлення датчика струму необхідна напруга в 3,3 В, отримуються шляхом перетворення 5 В до 3,3 В за допомогою другого понижуючого перетворювача.

Структурна схема замкненої системи автоматичного керування ДПС з ПІД-регуляторами струму та ЕРС показано на рисунку 12. За допомогою пульта керування варіювалася пропорційна, інтегральна та

диференційна складові ПІД-регуляторів.

Всі графіки були отримані на веб-сторінці в браузері через Wi-Fi. Для відображення даних було взято за основу веб-сторінку з фіксованою IP-адресою. Цей вибір був обґрунтований тим що, веб-сторінку можливо відкрити на смартфоні, планшеті, ноутбуці, персональному комп'ютері, як це зображено на рисунках 13 та 14. Тобто варіант є універсальним та найменш кропіткий в порівнянні з USB інтерфейсом.

Було проведено експерименти з імпульсним (рис. 15-17) та плавним (рис. 18-20) збільшенням швидкості двигуна та варіюванням складових ПІД-регулятора для кожного із них.

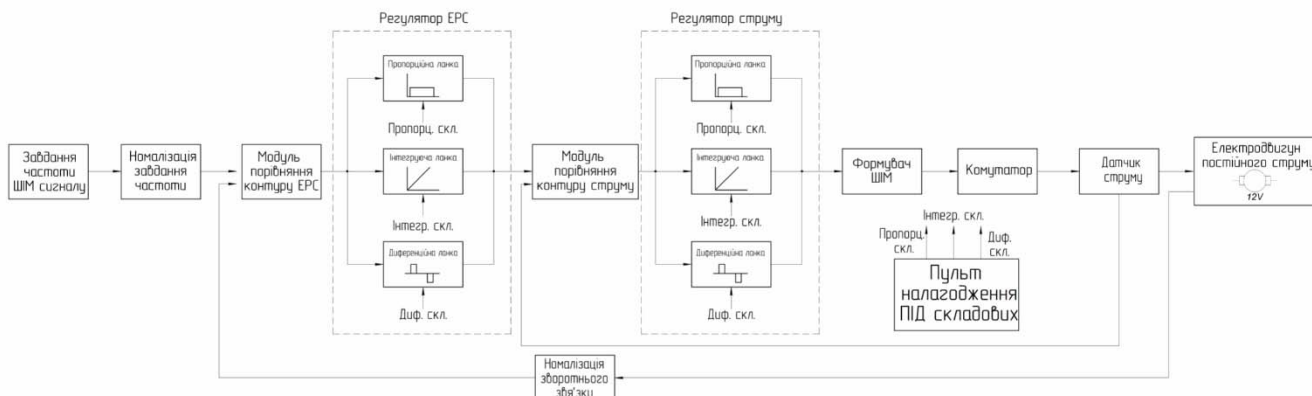


Рисунок 12. Структурна схема системи автоматичного керування з ПІД регуляторами струму та ЕРС

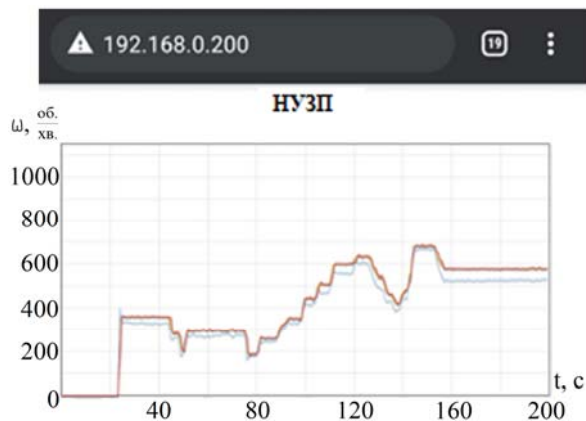


Рисунок 13. Графік системи на смартфоні

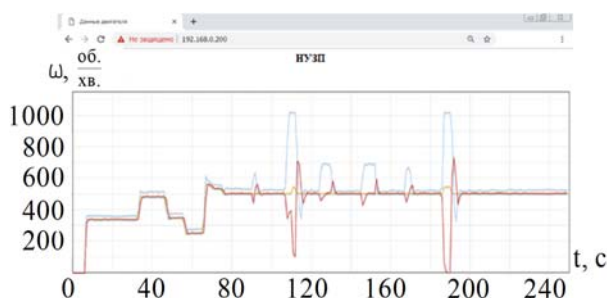


Рисунок 14. Графік системи на ПК

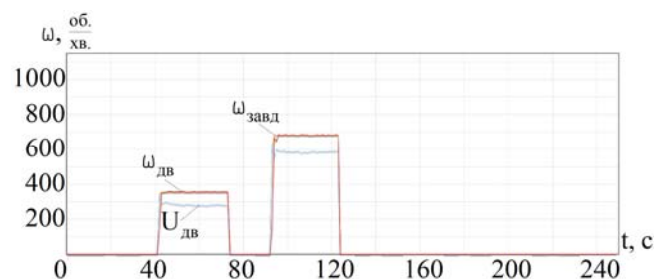


Рисунок 15. Перехідні процеси САК при $p=0,21$, $i=0,022$, $d=0,05$

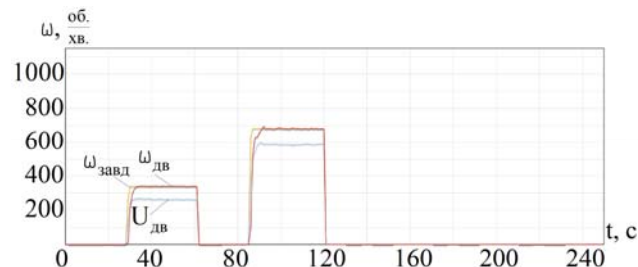


Рисунок 16. Перехідні процеси САК при $p=0,1$, $i=0,01$, $d=0,05$

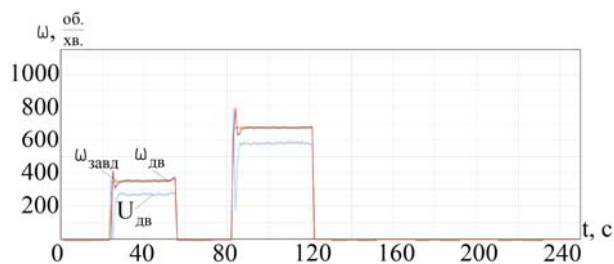


Рисунок 17. Перехідні процеси САК при $p=0,55$, $i=0,035$, $d=0,1$

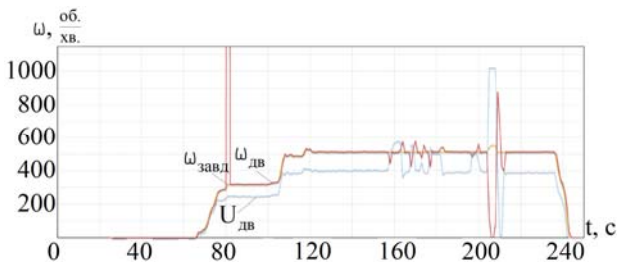


Рисунок 18. Перехідні процеси САК при $p=0,21$, $i=0,022$, $d=0,05$

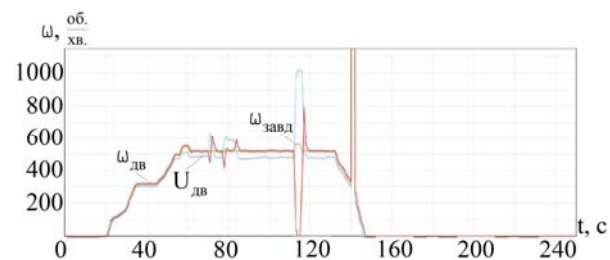


Рисунок 19. Перехідні процеси САК при $p=0,1$, $i=0,01$, $d=0,05$

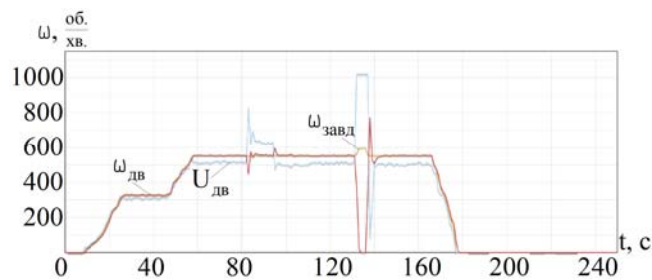


Рисунок 20. Перехідні процеси САК при $p=0,55$, $i=0,035$, $d=0,1$

Отже, за допомогою розробленого лабораторного стенда з бездротовим інтерфейсом було отримано результати експерименту при варіюванні складових ПД-регулятора ЕРС замкненої системи автоматичного керування ДПТ. При цьому студенти мають можливість спостерігати онлайн вплив змін відповідних складових ПД-регулятора на динаміку привода та зберігати графіки перехідних процесів САК для подальшого аналізу та додавання у звіти робіт.

В. ВИСНОВКИ

Розроблено лабораторний стенд з бездротовим інтерфейсом для вивчення роботи ДПС та проведення досліджень замкненої САК ДПС зі зворотнім зв'язком за ЕРС та ПД-регулятором. Програмне забезпечення стенду дозволяє на основі знятих з ДПС даних відображати їх дистанційно у вигляді графіків на різних гаджетах (смартфоні, планшеті, ноутбучі, персональному комп'ютері) через Wi-Fi.

Для силового комутатора та системи керування був обраний мікроконтролер STM32F103C8T6, розроблена силова та керуюча плата для керування двигуном за допомогою ШІМ. Інформація, яка збирається зі стенду, зберігається в модулі microSD-card. Для дистанційної передачі поточних даних роботи двигуна до смартфона з виводом інформації на браузер було встановлено плату NodeMCU v3.

Використання цього лабораторного стенду у навчальному процесі розширить можливості вивчення електроприводу постійного струму та систем керування ним, а також дозволить студентам при вивченні будови самого стенду отримати знання про використання мікропроцесорних систем для збору, обробки сигналів та передачі даних через бездротовий інтерфейс.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Осадчий В. В. Лабораторный стенд для исследования микропроцессорных систем управления двухмассовым электроприводом / В. В. Осадчий, Е. С. Назарова, В. В. Брылистый, Р. И. Савилов // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2016. – № 22(98). – С. 33-38. <http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.22.98.2016.05>
- [2] Osadchyy V. Laboratory Stand for Investigation of Liquid Level Microprocessor Control Systems / V. Osadchyy, O. Nazarova // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenichuk, Ukraine. – 2020. – P. 1-4. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240868.
- [3] Назарова О. С. Ідентифікація кутової швидкості при завадах в оптичній системі енкодера / О.С. Назарова, В. В. Осадчий, І. А. Мелешко, М. О. Олейніков // *Вісник НТУ «ХПІ»* - Харків, 2019. – С.65-69. <http://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.16.12>
- [4] Sheremet O. I. Intelligent system based on a convolutional neural network for identifying people without breathing masks / O. I. Sheremet, O. Ye. Korobov, O. V. Sadovoi, Yu. V. Sokhina // *Applied Aspects of Information Technology*, 2020. – Vol.3. – No.3. – P. 133–134. DOI: 10.15276/aait.03.2020.2
- [5] Chornyi O.P. A virtual complex with the parametric adjustment to electromechanical system parameters / O.P. Chornyi, S.A. Serhiienko // *Tekhnichna elektrodynamika*, 2019. – No 1. – P. 38–41. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.038>

- [6] Nazarova O. Computer Modeling of Multi-Mass Electromechanical Systems / O. Nazarova // The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), 2020. - Vol. 2608. - P. 489-498.
- [7] Berestinov A. A. Development of a Laboratory Stand to Study of Industrial Protocols / A. A. Berestinov, A. S. Nesterov and A. Z. Kulganatov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. - 2020. - P. 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111994.
- [8] Broisin J. A remote laboratory to leverage motivation of learners to practice: An exploratory study about system administration / J. Broisin, R. Venant and P. Vidal // Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Bangkok, Thailand. - 2015. - P. 140-142. doi: 10.1109/REV.2015.7087280.
- [9] Alszer S. Modular, didactic flexible manufacturing system — Case study / S. Alszer and J. Krystek // 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Auckland. - 2018. - P. 121-125. doi: 10.1109/ICCAR.2018.8384655.
- [10] Levinzon S. V. Use of the modern stand equipment in the educational process in the course «electrical engineering» / S. V. Levinzon, N. V. Tsarkova, D. V. Melnikov // 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj-Napoca, Romania. - 2014. - P. 1-4. doi: 10.1109/UPEC.2014.6934714.
- [11] Osses F. Remote laboratory for position control using a Quanser Servo SRV02 operated via Moodle / F. Osses, R. Ortega, C. Muñoz-Poblete // 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Concepcion. - 2018. - P. 1-6. doi: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609733.
- [12] Eliot N. A Flexible Laboratory Environment Supporting Honeypot Deployment for Teaching Real-World Cybersecurity Skills / N. Eliot, D. Kendall and M. Brockway // IEEE Access, 2018. - Vol. 6. - P. 34884-34895. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2850839.
- [13] Abdulov A. Remote Laboratory to Study Mobile Robot Odometry / A. Abdulov and A. Abramnikov // 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Moscow, Russia, 2017. - P. 1-4. doi: 10.1109/AICT.2017.8687067.
- [14] Arsirii Olena O. Information technology of supporting architectural solutions using polyglot persistence concept in learning management systems / Olena O. Arsirii, Maria G. Glava, Matthias Kolonko, Alina O. Glumenko // Applied Aspects of Information Technology, 2020. - Vol.3. - No.2. - P. 13-31. DOI: 10.15276/aait.02.2020.1
- [15] Kowalik R. New laboratory stand and teaching program — Transformer monitoring system / R. Kowalik, P. Kopański, K. Glik // 2010 Modern Electric Power Systems, Wroclaw, Poland, 2010. - P. 1-7.
- [16] Wojtulewicz A. Multiple-input multiple-output laboratory stand for process control education / A. Wojtulewicz, P. Chaber and M. Ławryńczuk // 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzydroje, Poland, 2016. - P. 466-471. doi: 10.1109/MMAR.2016.7575180.
- [17] Michaeli L. Remote access cost effective measurement stand for teaching basic electronic circuits / L. Michaeli, M. Godla and J. Šaliga // Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, Prague, Czech Republic, 2011. - P. 188-191. doi: 10.1109/IDAACS.2011.6072737.
- [18] Antipin A. S. Electroenergetical training laboratory with remote access to stands / A. S. Antipin, V. E. Frizen, V. N. Udintsev and S. L. Nazarov // 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, 2017. - P. 170-173. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955425.
- [19] Asumadu J. A. A Web-based electrical and electronics remote wiring and measurement laboratory (RwmLAB) instrument / J. A. Asumadu et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005. - Vol. 54. - No. 1, pp. 38-44, Feb., doi: 10.1109/TIM.2004.834597.
- [20] Abid R. Comparative study of the performances of the DC/DC Luo-converter in photovoltaic applications / R. Abid, F. Masmoudi and N. Derbel // 2017 International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C), Sfax, 2017. - P. 117-122. doi: 10.1109/SM2C.2017.8071831.
- [21] Ostroverkhov M. Output Voltage Stabilization Process Simulation in Generator with Hybrid Excitation at Variable Drive Speed / M. Ostroverkhov, V. Chumack and E. Monakhov // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019. - P. 310-313. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879781
- [22] Kulynych E.M. Laboratory stand with wireless interface for study of automatic control systems of dc electric drive / E.M. Kulynych, O.S.Nazarova, D.V. Goncharov, S.G. Chernyshev // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2020», (Одеса, 22 - 23 жовтня 2020 р.) / Одеська нац. акад. харч. технологій. – Одеса: ОНАХТ, 2020. – С. 86-88.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2020

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД С БЕСПРОВОДНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

- КУЛИНИЧ Э.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: kuliniched@gmail.com;
- НАЗАРОВА Е.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: nazarova16@gmail.com;
- ГОНЧАРОВ Д.В. магистр кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: nicksonszp@gmail.com
- ЧЕРНИШЕВ С.Г. магистр кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: flashboy811@gmail.com
- ПISKУН В.В. студент группы Е-317 кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: vlad.piskun.2000@gmail.com

Цель работы. Разработка лабораторного стенда с беспроводным интерфейсом для изучения и исследования систем автоматического управления электроприводами постоянного тока.

Методы исследования. Физический эксперимент на разработанном лабораторном стенде, компьютерное моделирование, расчетно-аналитический методы.

Полученные результаты. В ходе исследования были рассмотрены и проанализированы преимущества и недостатки существующих разработок лабораторных стендов с виртуальной и дистанционной составляющей, возможностью организации беспроводного интерфейса, с учетом экономичности, мобильности, надежности и простоты исполнения, а также возможности использования в качестве учебного стенда. Разработано подключение стенда с помощью USB и Wi-Fi. Для силового коммутатора и системы автоматического управления использован микроконтроллер STM32F103C8T6. Интерфейсная часть состоит из платы NodeMCU, модуля MicroSD карты, блока управления интерфейсом, LCD 16x2 и I2C преобразователя. Для передачи информации и программирования стенда применен интерфейс UART - USB. Предусмотрена возможность текущей дистанционной передачи информации о режимах и параметры работы двигателя к компьютеру с выводом на браузер путем установки модуля Wi-Fi ESP8266MOD. Разработана замкнутая система автоматического управления двигателем постоянного тока с ПИД-регуляторами тока и ЭДС. Были проведены эксперименты с импульсным и плавным увеличением скорости двигателя и варьированием составляющих ПИД-регуляторов с помощью пульта управления. Все графики результатов эксперимента были получены на веб-странице с фиксированным IP-адресом в браузере через Wi-Fi.

Научная новизна. Предложена и разработана структура системы дистанционного мониторинга и управления на основе аппаратно-программного совмещения телекоммуникационной и измерительной систем, которая отличается от существующих наличием текущей беспроводной передачи информации, позволяет дистанционно получать данные исследований систем автоматического управления двигателем постоянного тока.

Практическая ценность. Разработанный лабораторный стенд с беспроводным интерфейсом позволяет дистанционно получать и хранить экспериментальные данные о параметрах исследуемого двигателя в режиме реального времени.

Ключевые слова: лабораторный стенд; беспроводной интерфейс; микроконтроллер; система автоматического управления; электропривод; постоянный ток.

LABORATORY STAND WITH WIRELESS INTERFACE FOR INVESTIGATION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF DC ELECTRIC DRIVES

- KULYNYCH E.M. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the department "Electric drive and automation of industrial equipment" of the National University

- “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kuliniched@gmail.com;
- NAZAROVA O.S. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the department “Electric drive and automation of industrial equipment” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nazarova16@gmail.com;
- GONCHAROV D.V. Master of the department “Electric drive and automation of industrial equipment” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nicksonszp@gmail.com
- CHERNYSHEV S.G. Master of the department “Electric drive and automation of industrial equipment” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: flashboy811@gmail.com
- PISKUN V.V. Student of the group E-317 of the department “Electric drive and automation of industrial equipment” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vlad.piskun.2000@gmail.com

Purpose. Development of a laboratory stand with a wireless interface for the study and research of automatic control systems for DC electric drives.

Methodology. Physical experiment on the developed laboratory bench, computer modelling, calculation and analytical methods.

Findings. The study considered and analyzed the advantages and disadvantages of existing developments of laboratory stands with virtual and remote components, the possibility of organizing a wireless interface, taking into account cost-effectiveness, mobility, reliability and simplicity, as well as the possibility of using as a training stand. The connection of the stand by means of USB and Wi-Fi is developed. The STM32F103C8T6 microcontroller is used for the power switch and the automatic control system. The interface part consists of a NodeMCU board, a MicroSD card module, an interface control unit, a 16x2 LCD and an I2C converter. The UART-USB interface is used for information transfer and programming of the stand. The possibility of current remote transmission of information about the modes and parameters of the engine to a computer with a browser output by installing the Wi-Fi module ESP8266MOD. A closed system of automatic DC motor control with PID current regulators and EMF has been developed. Experiments were performed with a pulse and smooth increase in motor speed and variation of the components of the PID controllers using the control panel of the laboratory stand. All graphs of the results of the experiment were obtained on a web page with a fixed IP address in the browser via Wi-Fi.

Originality. The structure of the remote monitoring and control system based on hardware and software combination of telecommunication and measuring systems is proposed and developed, which differs from the existing ones by the presence of current wireless transmission of information, which allows to remotely receive research data of automatic DC motor control systems.

Practical value. The developed laboratory stand with the wireless interface allows to receive and store experimental data on parameters of the investigated engine in real time remotely.

Keywords: laboratory stand; wireless interface; microcontroller; automatic control system; electric drive; direct current.

REFERENCES

- [1] Osadchyy, V. V., Nazarova, E.S., Brylystyy, V.V., Savilov, R.I. (2016). Laboratornyj stend dlja issledovanija mikroprocessornyh sistem upravlenija dvuhmassovym jelektroprivodom [Laboratory stand for research of microprocessor control systems of two-mass electric drive]. Elektrotechnichni ta komp'juterni sistemi, № 22(98), 33-38. <http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.22.98.2016.05>
- [2] Osadchyy V., Nazarova O. (2020). Laboratory Stand for Investigation of Liquid Level Microprocessor Control Systems. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240868.
- [3] Nazarova, O.S., Osadchyy, V.V., Meleshko, I.A., Oleinikov, M.O. (2019). Identifikacija kutovoi shvidkosti pri zavadah v optichnij sistemi enkodera [Identification of angular velocity in case of interference in the optical system of the encoder]. Visnik NTU «KhPI», Kharkiv, 65-69. <http://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.16.12>
- [4] Sheremet, O. I., Korobov, O. Ye., Sadovoi, O. V., Sokhina, Yu. V. (2020). Intelligent system based on a convolutional neural network for identifying people without breathing masks. Applied Aspects of Information Technology, Vol.3 No.3, 133-134. DOI: 10.15276/aait.03.2020.2
- [5] Chorny, O.P., Serhienko, S.A. (2019). A virtual complex with the parametric adjustment to electro-mechanical system parameters. Tekhnichna elektrodynamika, No 1, pp. 38-41. doi: <https://doi.org/10.15407/techne2019.01.038>
- [6] Nazarova, O. Computer Modeling of Multi-Mass Electromechanical Systems. The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Vol. 2608, 489-498.
- [7] Berestinov, A. A., Nesterov, A. S., Kulganatov, A.Z. (2020). Development of a Laboratory Stand to Study of Industrial Protocols. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and

- Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111994.
- [8] Broisin, J., Venant, R., Vidal, P. (2015). A remote laboratory to leverage motivation of learners to practice: An exploratory study about system administration," Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Bangkok, Thailand, 140-142, doi: 10.1109/REV.2015.7087280.
- [9] [9] Alszer, S., Krystek, J. (2018). Modular, didactic flexible manufacturing system — Case study. 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Auckland, 121-125. doi: 10.1109/ICCAR.2018.8384655.
- [10] Levinzon, S. V., Tsarkova, N. V., Melnikov, D. V., (2014). Use of the modern stand equipment in the educational process in the course «electrical engineering». 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj-Napoca, Romania, 1-4. doi: 10.1109/UPEC.2014.6934714.
- [11] Osses, F., Ortega, R., Muñoz-Poblete C. (2018). Remote laboratory for position control using a Quanser Servo SRV02 operated via Moodle. 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Concepcion, 1-6. doi: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609733.
- [12] Eliot, N., Kendall, D., Brockway, M. (2018). A Flexible Laboratory Environment Supporting Honey-pot Deployment for Teaching Real-World Cybersecurity Skills, IEEE Access, vol. 6, 34884-34895, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2850839.
- [13] Abdulov, A., Abramnikov, A., (2017). Remote Laboratory to Study Mobile Robot Odometry. 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Moscow, Russia, 1-4. doi: 10.1109/ICAICT.2017.8687067.
- [14] Arsirii, Olena O., Glava, Maria G, Kolonko, Matthias, Glumenko, Alina O. (2020). Information technology of supporting architectural solutions using polyglot persistence concept in learning management systems. Applied Aspects of Information Technology, Vol.3, No.2, 13–31. DOI: 10.15276/aait.02.2020.1
- [15] Kowalik, R., Kopański, P., Glik, K. (2010). New laboratory stand and teaching program — Transformer monitoring system. 2010 Modern Electric Power Systems, Wroclaw, Poland, 1-7.
- [16] Wojtulewicz, A., Chaber, P., Ławryńczuk, M. (2016). Multiple-input multiple-output laboratory stand for process control education. 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, Poland, 466-471. doi: 10.1109/MMAR.2016.7575180.
- [17] Michaeli, L., Godla, M., Šaliga, J. (2011). Remote access cost effective measurement stand for teaching basic electronic circuits. Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, Prague, Czech Republic, 188-191. doi: 10.1109/IDAACS.2011.6072737.
- [18] Antipin, A. S., Frizen, V. E., Udintcev, V. N., Nazarov, S. L. (2017). Electroenergetical training laboratory with remote access to stands. 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, 170-173. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955425.
- [19] Asumadu, J. A. et al. (2005). A Web-based electrical and electronics remote wiring and measurement laboratory (RwmLAB) instrument. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 54, no. 1, 38-44. doi: 10.1109/TIM.2004.834597.
- [20] Abid, R., Masmoudi, F., Derbel, N. (2017). Comparative study of the performances of the DC/DC Luo-converter in photovoltaic applications. 2017 International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C), Sfax, 117-122, doi: 10.1109/SM2C.2017.8071831.
- [21] Ostroverkhov, M., Chumack, V., Monakhov, E., (2019). Output Voltage Stabilization Process Simulation in Generator with Hybrid Excitation at Variable Drive Speed. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 310-313. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879781
- [22] Kulynych, E.M., Nazarova, O.S., Goncharov, D.V., Chernyshev, S.G. (2020). Laboratory stand with wireless interface for study of automatic control systems of dc electric drive. XIII Mizhnarodna naukovo-praktichna konferencija "Informacijni tehnologii i avtomatizacija – 2020", Odesa: ONAHT, 86-88.