

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Вісник
Національного технічного
університету «ХПІ». Серія:
Проблеми автоматизованого
електропривода.
Теорія і практика

Bulletin of the
National Technical
University "KhPI". Series:
Problems of automated
electrodrive.
Theory and practice

№ 4 (1358) 2020

No. 4 (1358) 2020

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2020

Kharkiv
NTU "KhPI", 2020

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. Політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2020, № 4 (1358). — 84 с. — ISSN 2079-8024.

Видання присвячене висвітленню питань теорії електромеханічних систем, досягнень в галузі систем керування автоматизованого електроприводу та його компонентів, енергозбереженню засобами електроприводу. Публікуються статті, що присвячені питанням підготовки фахівців з автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, мекатроніки та робототехніки. Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців у галузі систем автоматизованого електроприводу та його складових елементів.

The publication is devoted to covering the issues of the theory of electromechanical systems, advances in the field of control systems of automated electric drive and its components, energy saving using electric drive. Published articles are devoted to the specialists preparing in the automation of electromechanical systems and electric drive, mechatronics and robotics and made for researchers, teachers of higher education, graduate students, students and specialists in the field of automated electric drive systems and its constituent elements.

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України КВ № 5256 від 2 липня 2001 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом МОН України № 1328 від 21 грудня 2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року».

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України,
НТУ «ХПІ», Україна

Заступник головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»,
Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

Клепіков В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заступник відповідального редактора:

Шамардіна В. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Асмолова Л. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Буряковський С. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна;

Гриб О. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна;

Дімітров Л., проф., Софійський технічний ун-т, Болгарія;

Долбня В. Т., проф., НТУ «ХПІ», Україна;

Качанов П. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна;

Кузнецов Б. І., проф., ДУ «ІТПМ» НАН України, Україна;

Lyshevski S., проф., Рочестерський ін-т технологій, США;

Лозинський О. Ю., проф., НУ «Львівська політехніка»,

Україна;

Leidhold R., проф., Ун-т імені Отто фон Геріке, Німеччина;

Михальський В. М., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України,

ІЕД НАН України, Україна;

Орловський І. А., проф., Технологічний ун-т природничих

наук, Польща;

Островерхов М. Я., проф., НТУУ «КПІ», Україна;

Пересада С. М., проф., НТУУ «КПІ», Україна;

Розов В. Ю., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України,

ДУ «ІТПМ» НАН України, Україна;

Толочко О. І., проф., НТУУ «КПІ», Україна;

Чунашвілі Б. М., проф., Грузинський технічний ун-т,

Грузія;

Шеремет О. І., проф., Донбаська державна машинобудівна
академія, Україна;

Щербак Я. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна.

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Editor-in-chief

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. Of
National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Secretary

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff

Associate editor:

Klepikov V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Deputy Associate editor:

Shamardina V. M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Asmolova L. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Buryakovskiy S. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine;

Grib O. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine;

Dimitrov L., prof., Technical University of Sofia, Bulgaria;

Dolbnja V. T., prof., NTU "KhPI", Ukraine;

Kachanov P. O., prof., NTU "KhPI", Ukraine;

Kuznetsov B. I., prof., SI "ITPM" NAS of Ukraine, Ukraine;

Lyshevski S., prof., Technology Institute of Rochester, USA;

Losinsky O. Yu., prof., Lviv Politechnic National University,

Ukraine;

Leidhold R., prof., Otto von Guericke University, Germany;

Mikhalsky V. M., dr. tech. sc., member-cor. of NAS of Ukraine,

IED NAS of Ukraine, Ukraine;

Orlovsky I. A., prof., UTP University of Science and Technology,

Poland;

Ostroverkhov M. J., prof., National Technical University of Ukraine

"KPI", Ukraine;

Peresada S. M., prof., National technical university of Ukraine "KPI",

Ukraine;

Rozov V. Yu., dr. tech. sc., member-cor. of NAS of Ukraine,

SI "ITPM" NAS of Ukraine, Ukraine;

Tolochko O. I., prof., National Technical University of Ukraine

"KPI", Ukraine;

Chunashvili B. M., prof., Technical University of Georgia, Georgia;

Sheremet O. I., prof., Donbass state engineering Academy, Ukraine;

Scherbak Ya. V., prof., NTU "KhPI", Ukraine.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 1 від 31 січня 2020 р.

В. Б. КЛЕПІКОВ

**ДО 90-РІЧЧЯ КАФЕДРИ «АВТОМАТИЗОВАНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ»
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Зроблено історичний огляд процесу зародження викладання електротехніки та підготовці перших інженерів-електриків у заснованому в 1885 році першому вищому технічному закладі України «Харківський технологічний інститут». Відображену роль професора Копняєва П.П. як засновника української електротехнічної школи. Розглянуті етапи становлення та розвитку підготовки фахівців і наукових досліджень в галузі електромеханічних систем автоматизації і електричного приводу на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» за часі її існування та її роль у вирішенні актуальних для народного господарства країни проблем. Вказані серед найбільш суттєвих наукових результатів: створення нового наукового напрямку з динаміки електромеханічних систем з від'ємним в'язким тертям; виявлення явища підсилення пружних коливань нелінійністю тертя; використання, першими в СНД, методів нейронних мереж і генетичних алгоритмів для керування електроприводами; розвиток методів синтезу електромеханічних систем з наглядачами стану; визначення ролі модернізації електроприводів у вирішенні проблеми економії енергетичних ресурсів в Україні. Вказані впровадження науково-технічних розробок кафедри на підприємствах країни. Відмічена ініціативна роль кафедри у започаткуванні першої і організації 24-х Міжнародних наукових конференцій з проблем автоматизованого електроприводу. Надані результати роботи з підготовки кадрів вищої кваліфікації; міжнародного співробітництва; учебово-методичної роботи, розвитку матеріально – технічної бази, участі у міжнародних проектах «TEMPUS-ICO-Op» і «TEMPUS-MRAM». Вказані існуючі проблеми діяльності кафедри.

Ключові слова: професор Копняєв П.П., Харківський технологічний інститут, електротехнічна школа в Україні, кафедра «Автоматизовані електромеханічні системи», динаміка електромеханічних систем з від'ємним в'язким тертям.

В. Б. КЛЕПІКОВ

**К 90-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

Сделан исторический обзор процесса зарождения преподавания электротехники и подготовки первых инженеров-электриков в основанном в 1885 году первом высшем техническом учебном заведении Украины «Харьковский технологический институт». Отображена роль профессора Копняева П.П. как основателя украинской электротехнической школы. Рассмотрены этапы становления и развития подготовки специалистов и научных исследований в области электромеханических систем автоматизации и электрического привода на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» за время ее существования и ее роль в решении актуальных для народного хозяйства страны проблем. Указанны среди наиболее существенных научных результатов: создание нового научного направления по динамике электромеханических систем с отрицательным вязким трением; обнаружение явления усиления упругих колебаний нелинейного трения; использования, первыми в СНГ, методов нейронных сетей и генетических алгоритмов для управления электроприводами; развитие методов синтеза электромеханических систем с наблюдателями состояния; определение роли модернизации электроприводов в решении проблемы экономии энергетических ресурсов в Украине. Указанны внедрения научно-технических разработок кафедры на предприятиях страны. Отмечена инициативная роль кафедры в проведении первой и организации 24-х Международных научных конференций по проблемам автоматизированного электропривода. Представлены результаты работы по подготовке кадров высшей квалификации; международного сотрудничества; учебно-методической работы, развития материально – технической базы, участия в международных проектах «TEMPUS-ISO-Op» и «TEMPUS-MPAM». Указанны существующие проблемы деятельности кафедры.

Ключевые слова: профессор Копняев П.П., Харьковский технологический институт, электротехническая школа в Украине, кафедра «Автоматизированные электромеханические системы», динамика электромеханических систем с отрицательным вязким трением.

V. B. KLEPIKOV

**TO 90-TH ANNIVERSARY OF THE
AUTOMATED ELECTROMECHANICAL SYSTEMS DEPARTMENT
OF NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNICAL INSTITUTE»**

A historical review of the electrical engineering teaching origin process and first electrical engineers education in the first higher technical institution of Ukraine «Kharkiv Institute of Technology» founded in 1885, was accomplished. The role of Professor Kopnyayev P.P. as the founder of the Ukrainian electrical engineering school was reflected. The stages of formation and development of specialists and scientific researches training in the field of electromechanical systems of automation and electric drive at the department of «Automated electromechanical systems» for the time of its existence and its role in solving actual problems for the national economy are considered. The following are the most significant scientific results: creation of a new scientific direction «Dynamics of electromechanical systems with negative viscous friction»; the detection of the elastic oscillations strengthening phenomenon by friction nonlinearity; first use in the CIS neural network and genetic algorithms methods for electric drives control; electromechanical systems synthesis methods development with state observers; determining the electric drives modernization role in solving the problem of energy saving in Ukraine. The implementation of scientific and technical results of the department at the enterprises of the country are indicated. The initiative role of department in initiation of the 1-st and organization of 24 International scientific conferences on the problems of automated electric drive was noted. The results of work on the higher qualification staff training; international cooperation; educational and methodological work, development of facilities and resources, participation in international projects «TEMPUS-ISO-Op» and «TEMPUS-MPAM» are given. Existing problems of activity of the department are indicated.

Key words: Key words: Professor Kopniayev P.P, Kharkiv Institute of Technology, Electrotechnical School in Ukraine, Department of «Automated electromechanical systems», Dynamics of electromechanical systems with negative viscous friction.

Перший в Україні того часу вищий технічний заклад освіти «Харківський технологічний інститут», було відкрито у 1885 році, тобто 135 років тому. Він є ровесником відомого Стенфордського університету, який в ті ж часи було засновано в Каліфорнії у Сполучених Штатах Америки [1].

Біля витоків зародження електротехнічної школи Харківського технологічного інституту (ХТИ) стояли професори **Олексій Костянтинович Погорелко** та **Микола Петрович Клобуков**. Слід також відмітити, що саме у часи роботи в ХТИ (1887 – 1893 р.р.) видатний вчений **Олександр Михайлович Ляпунов** створив труди з теорії стійкості руху [2, 3], що у подальшому стало основою створення, зокрема, автоматизованих систем електроприводу. Ця стаття має частково оглядовий характер. Деякі історичні факти освітлені раніше у роботах [2, 3, 4, 5]. В даній роботі більшою мірою описані раніше не розглянуті у вищевказаних статтях періоди діяльності кафедри.

Погорелко О.К. до 1885 року працював у відкритому ще у 1805 році Харківському університеті, спеціалізувався в галузі теоретичної фізики і деякий час у 1878 році під керівництвом професора Гельмгольца Г. у Німеччині досліджував явище деформації тіл під впливом електричних сил. Погорелко О.К. значне місце в курсі фізики відводив розділом з електротехніки, запропонував нові дисципліни і проведення практичних занять з електротехніки. Він ініціював створення у ХТИ електротехнічної лабораторії, розпочав викладання з теорії динамомашин та електротехніки, написав підручники «Теорія електричества» (1899 р.) та «Електромеханіка» (1902 р.).

Погорелко О.К. вів активну громадську діяльність, вивчав роботу комунального господарства міста, виконував наукові розробки з проблем самоврядування, благоустрою, трамвайного транспорту, електроосвітлення та інші. За його проектом у 1897 році була створена міська електростанція. У 1900 році його вибирають Харківським Головою міста, яким він пропрацював 12 років, зберігаючи контакт із вченими ХТИ. Він реалізував багато проектів, в тому числі введення трамваю та відкриття 6-ти трамвайні маршрутів, будівництво водопроводу, міської каналізації, відкриття декількох лікарень та інші. Хоча, як вчений, Погорелко О.К. більшою мірою відомий працями з фізики, його заслуга у становленні електротехніки, як учебової дисципліни та впровадженні досягнень електротехнічної науки того часу у практичні проекти, дуже велика.

З 1892 року лекційні курси загальної електротехніки і теорії електрики починає викладати Микола Петрович Клобуков (1859 – 1900 р.р.). Він народився на Чернігівщині, навчався у Московському вищому технічному училищі, а потім у Мюнхенському технічному університеті, після завершення якого був залишений там для роботи. Читав лекції з електрохімії, проводив практичні заняття, приймав участь у створенні першої в Німеччині електрохімічної лабораторії, вів наукову роботу, публікувався у відомих німецьких журналах і на момент приходу в ХТИ вже був відомим

вченим, мав 46 наукових праць з електрохімії, електрометалургії та електротехніки. Коло його наукових інтересів було широким, він також вивчав питання корозії, створював прилади для демонстрації законів електричних кіл, визначення магнітної проникності, передачі електричних вимірювальних даних на відстань.

У 1894 році, до відомих експериментів Попова О.С. і Марконі Г. з передачі радіосигналу, на засіданні Харківського відділення технічного товариства він зробив доповідь «Современное состояние вопроса о телеграфировании без помощи проводов» привертаючи увагу вчених до даної проблеми. В 1893 – 1895 р.р. він видає літографічним способом перші в Україні підручники з електротехніки, в яких перша частина була присвячена теоретичним питанням, а друга – генераторам струму, принципам роботи електродвигунів і застосування електричних машин.

В 1898 році вченим комітетом Харківського технологічного інституту з ініціативи Погорелко О.К. та Клобукова М.П. були розроблені пропозиції з організації кафедри електротехніки і електротехнічного відділення, поширення викладання електротехніки, введення лабораторного практикуму і дипломного проектування, посилення матеріальної бази електротехнічного відділення. В учебовий план були введені дисципліни: прикладна електротехніка і прикладна електрохімія (для студентів хімічного відділення).

З приходом в ХТИ у 1898 році **Копняєва Павла Петровича** Клобуков М.П. передає йому викладання курсів з електротехніки, зосередившись на електрохімії, і стає засновником електрохімічної школи.

Копняєв П.П. навчався у Петербурзькому технологічному інституті і у 1896 році одержав з відзнакою диплом інженера-механіка. Ale його дуже вабила електротехніка і він поступає на третій курс Дармштадського політехнічного інституту в Німеччині, де під керівництвом професора Кітлера Е. виконує декілька самостійних проектів електричних машин в лабораторіях електротехнічного факультету.

На початковому етапі становлення електротехнічної школи в Україні того часу (Львів входив у склад Австро-Угорщини, а Київський політехнічний був створений на 13 років пізніше ХТИ) Копняєв П.П. відіграв важливішу роль в постановці учебового процесу, розвитку наукових досліджень, впровадженні в практику досягнень електротехніки, а також відбору талановитих учнів і співробітників, які стали у майбутньому відомими вченими електротехніками.

З початком роботи Копняєва П.П. в ХТИ збільшується до 3-х годин на тиждень викладання електротехніки, під електротехнічні лабораторії виділяються нові приміщення, які оснащуються сучасним обладнанням, створюється електростанція інституту. Незначна кількість учебових посібників того часу з електротехніки не задовільняла швидко зростаючих потреб. Деякі з них мали довідковий характер, містили несистематизовані, а іноді нечіткі та суперечливі дані. Інші наповнювались змістом далеким від електротехніки.

Копняєв П.П завдяки широкій науковій ерудиції та методичному таланту був єдиним в Україні лектором, який персонально читав лекції з восьми електротехнічних дисциплін: електротехніки, електричних машин, електричних приладів, електричних вимірювань, техніки високих напруг і електричної тяги. Літографічним способом він видає курси «Електротехніка» (1900 р.), «Лекції з електротехніки» (1902 р.), «Лекції по електричним вимірюванням» (1903 р.), «Розрахунок електричних мереж» (1904 р.) [5, 11].

З 1899 р. Павло Петрович розпочинає дипломне проектування і підготовку 5-ти перших в Україні інженерів електротехнічного профілю, а у 1904 р. їх число досягає 25 осіб. У 1904 р. Копняєв П.П. видає фундаментальний труд «Электрические машины постоянного тока» (472 сторінок, 382 рисунка), побудований на класичних, ясних принципах, в якому ретельно і гармонічно розроблені питання теорії, проектування, дослідження, чітко виділені загальні властивості електродвигунів різних типів. Довгий час ця книга була головним підручником для студентів електротехнічного профілю всієї країни, завдяки чому була перевидана у 1926 році. У 1912 р. були видані його книги «Основы электричества и магнетизма» та «Электрические установки».

Копняєва П.П., як вченого, характеризують такі риси: науковий талант, широка ерудиція, вміння чітко викладати думки і передбачати розвиток науки. Йому належить авторство виведення загальних рівнянь для електродвигунів різних типів, створення аналітичних методів розрахунку магнітного поля в зазорі, методики розрахунку електричної тяги, пропозиції по створенню абсолютної системи одиниць, пionерські праці по аналоговому електричному моделюванню. Результати теоретичних досліджень він доводив до інженерних співвідношень, приділяючи увагу вирішенню практичних задач. Він розрахував форму полюсних наконечників для генераторів, які виготовляв Харківський електромеханічний завод. За його проектом було побудовано маріупольський трамвай і реконструйовано харківський трамвай.

Передбачаючи еру широкомасштабної електрифікації, Копняєв П.П. виступає ініціатором поширення електротехнічної освіти. Він розробив перші ескізи електротехнічного корпуса ХТІ і в 1903 р., 1907 р., 1912 р., 1914 р. подавав у вищі інстанції проект створення електротехнічного факультету, а починаючи з 1900 р., готовував інженерів електриків на механічному факультеті, деканом якого він був. В 1910 - 1911 р. створив електротехнічні лабораторії, які обслуговували потреби енергетики країни.

У 1919 р. його обирають ректором Харківського технологічного інституту і він домагається відкриття у 1921 році електротехнічного факультету, на який приймається 50 студентів першокурсників, і стає його першим деканом (1921 - 1930 р.р.). Він проводив велику організаційну роботу зі створення кафедр, залучаючи провідних електротехніків: **Хрушова В.М.** – у подальшому академіка, засновника у Харкові інституту енергетики, який після переводу у 1944 р. до Ки-

єва став флагманом електротехнічної науки України – інститутом електродинаміки Національної академії наук; професорів **Потебіню О.О.** – видного вченого в галузі електричної тяги і **Матвеєва А.Л.** – в галузі електричних станцій та інш.

Копняєв П.П. приділяв багато уваги відбору і підготовці молодих талановитих вчених і викладачів, які у подальшому стали відомими вченими, педагогами, фахівцями: Кияниця В.М., Бергер А.Я., Вашура Б.Ф., Аронов Р.Л., Рогачов І.С., Брон О.Б., Тищенко М.А., Мілях А.Л., доценти Фертік С.М., Сустін О.П., Ступель Ф.А., Борисенко М.І., легендарний головний інженер «Тяжпромелектропроекту» Копитов М.В. та багато інших. Значною мірою завдяки всезростаючому випуску інженерних електротехнічних кадрів, починаючи з 1900 року Харків став центром електротехнічної промисловості України.

Копняєв П.П. був багатогранною видатною особистістю. В статті, присвяченій 150 річчю з дня його народження [11], наведені його риси і заслуги як талановитого вченого і практика, педагога і організатора вищої освіти, людини з високою громадянською відповідальністю, принциповістю, мужністю і непідкупністю переконань, який виховав плеяду учнів, що стали видатними фахівцями, вченими, керівниками нових наукових шкіл та напрямків. Побудований за його технічним проектом електрокорпус і в наш час став спроможним, крім відкритих у 1930 році, вміщувати й створені у подальшому нові кафедри електротехнічного профілю. Створена Копняєвим П.П. наукова школа зробила значний вплив і на інші електротехнічні школи країни. Детальніше про це наведено в роботах [4÷7, 11]. Відмічу лише, що навіть першим завідувачем кафедри з електроприводу МЕІ у 1930 р. став Леві Г.П., який раніше працював доцентом кафедри електрообладнання ХТІ.

Вищевказане пояснюю, чому зроблений у 1967 році видатним вченим педагогом професором Львівського політехнічного інституту Губенко Т. П. до 100-річчя з дня народження Копняєва П. П. вираз: «...його дійсно можна вважати творцем української електротехнічної школи» у повній мірі відповідає дійсності [8].

Офіційною датою створення нашої кафедри вважається вересень 1930 року, коли ХТІ внаслідок реорганізації було поділено на три інститути: механіко-машинобудівний (ХММІ), хіміко-технологічний (ХХТІ), електротехнічний (ХЕТІ). У цьому році було завершено будівництво електрокорпусу, а електротехнічний факультет, створений ще у 1921 році, було поділено на два: електроенергетичний і електромашинобудівний. Але слід відмітити, що фактично підготовка фахівців з електроприводу здійснювалась і раніше на кафедрі електрообладнання, назву якої наша кафедра зберігла й при відкритті ХЕТІ.

За роки існування назва кафедри змінювалась:
1930 р. ÷ 1931 р. – кафедра електрообладнання;
1931 р. ÷ 1944 р. – кафедра електроприводу;
1944 р. ÷ 1992 р. – кафедра електрифікації промислових підприємств;

З 1992 р. і по теперішній час – кафедра «Автоматизовані електромеханічні системи».

Першим завідувачем кафедри став **Кремень Борис Осипович**, який працював начальником відділу Державного електротехнічного тресту і активно займався питаннями електрифікації підприємств Криворізького та інших промислових регіонів півдня України. Практична робота вабила його більшою мірою, тому він погодився завідувати кафедрою лише тимчасово.

Наступним завідувачем кафедри, який справив багатогранний вплив на її розвиток став **Губенко Тихон Павлович**. У 1927 році він закінчив Київський політехнічний інститут та був залишений в ньому для роботи викладачем. Ще будучи студентом у 1924 році під час практики на ХЕМЗі він зустрівся з П.П. Копня євим, потім приїздив до нього консультуватися з питань добудови до головного корпусу КПІ електротехнічної лабораторії і залишив добре враження як спеціаліст і людина. У 1930 році Губенко Т.П. було звинувачено у буржуазному націоналізмі і позбавлено можливості працювати в КПІ. В 1931 році він переїздить до Харкова (в той час столицю України), працює інженером «Електротресту», одночасно залиучається до роботи викладачем нашої кафедри, а в 1932 р. стає її завідувачем. При ньому здійснюється інтенсивне оснащення учебних лабораторій кафедри, постановка нових лабораторних робіт та навчальних курсів, розгортається активна наукова робота, формується науковий напрям з електроприводу. Тихону Павловичу доручається також завідування аспірантурою інституту.

Характерним для роботи кафедри того часу був дуже сильний зв'язок наукової, учебової і практичної діяльності. В ці роки Губенко Т. П. розробляє теорію електроприводів механізмів з циклічним навантаженням, закладає основи теорії електромеханічних систем із змінними параметрами, розробляє і впроваджує методи підвищення ефективності енергопостачання промислових регіонів і підприємств. Викладачі кафедри: Копитов М.В., Аронов Р.Л., Ю. Файнберг Ю.И., Ніколайчук М.Р., Ільїнський В.І. керували проектуванням і налагодженням електрообладнання та систем автоматизації прокатних і доменних цехів Запорізького, Криворізького, Новомосковського металургійних заводів, а також найкрупнішого в Європі заводу «Азовсталь»; Ворошиловградського паровозобудівного заводу, Харківського турбінного та багатьох інших важливих промислових об'єктів перших п'ятирічок. Науковим кредо Губенко Т.П. Було: «Завжди у кожній науково – технічній задачі потрібно намагатися дати нове і просте рішення, яке могло б знайти собі застосування в практичній інженерній діяльності».

Тихон Павлович був шанувальником музики, образотворчого мистецтва, сам малював пейзажі. Його захоплення українською культурою і мовою не одержувало схвалення з боку влади, і в 1938 році він приймає рішення про перехід до Ташкентського політехнічного інституту. Після Ташкентського політехнічного інституту (1938 - 1947 р.р.) він працював завідувачем кафедри у Львівському політехнічному інституті-

ті (1947 - 1971 рр.). Вихована ним школа нараховує 7 докторів і 28 кандидатів наук [9].

З 1938 по 1950 р. завідувачем кафедрою працює **Аронов Рафаїл Львович**, який у 1919 році закінчив фізико-математичний факультет Харківського університету, а в 1924 – електротехнічний факультет ХТІ. З 1925 р. він поєднував роботу в ХТІ з роботою на заводі ХЕМЗ, де за його ініціативою були створені центральні заводські лабораторії. Він очолював розробку, дослідження і впровадження у виробництво всіх типів автоматизованого електроприводу, в тому числі, першого вітчизняного блюмінгу і автоматичної системи загрузки доменної печі для заводу «Запоріжсталь», шлюзовых затворів каналу «Москва - Волга», напів-автоматичних шахтних підйомників та інших.

У цей період має місце подальша активізація наукової і методичної роботи. В 1934 році Аронов Р.Л. видає книгу «Электрооборудование промышленных электроприводов», а в 1935 році – «Автоматическое управление электроприводами» – на довгий час єдиний підручник з даної дисципліни. В 1938 році він захищає докторську дисертацію, здійснюючи наукове керівництво аспірантами. Кандидатські дисертації захищають: Кльомін-Шаронов В.А., Файнберг Ю.М., Горелік А.Л., Агронік С.Г., які стали у подальшому професійними викладачами кафедри.

Слід відмітити, що до 1940 р. кафедра електроприводу була єдиною в Україні профільованою з підготовки за даним напрямком. При цьому потреба в інженерах з електроприводу була вкрай висока. За 10 років з 1930 р. по 1940 р. кафедрою було випущено 586 інженерів, що в 2 - 4 рази перевищувало випуски за іншими електротехнічними спеціальностями.

У воєнні роки багато викладачів та студентів воювали на фронті, а частина була евакуйована ешелонами ХЕМЗ'у в різні міста Уралу, Поволжя, Сибіру, Середньої Азії і працювали на підприємствах Сталінграду, Свердловська, Челябінська, Кемерова, Прокоп'євська, Чебоксар, Уфи. Викладачі і випускники ХЕТІ справили великий вплив на формування в цих містах електротехнічних центрів, в тому числі у створенні в 1942 році в Москві тресту, який став у подальшому провідним в країні з електроприводу інститутом «ВНІІЕлектропривод». За свідченням його директора М. Г. Юнькова: «Интеллектуальным ядром проектно – конструкторского бюро треста явились специалисты ХЭМЗа, имеющие большой опыт по созданию и производству электроприводов» [10], більшість з яких були випускниками ХЕТІ.

ХЕТІ поновив свою діяльність у вересні 1943 р. після звільнення Харкова. Приміщення були поруйновані, обладнання відсутнє. Співробітники і викладачі,крім учебного процесу, брали участь у відновленні електротехнічного факультету, аудиторій і лабораторій. На кафедру повертаються учасники війни: Кльомін-Шаронов В.О. Гулякін В.Г., Агронік С.Г., Стаков В.П., Горелік А.Л., Маєвський О.О., Розанов Ю.А., Нотов О.Л., Губернаторова В.Г.

З 1950 р. завідувачем кафедри стає **Віктор Олександрович Кльомін-Шаронов**. Завдяки його енергії, ініціативності та наполегливості поновлюється матеріальна база кафедри, лабораторії оснащуються необхідним обладнанням, складається висококваліфікований колектив викладачів. В аспірантуру поступають Зеленов А.Б., Поздеев А.Д., Тупіцин А.І., Долбня В.Т., які стали у подальшому відомими видатними вченими. Прийом на перший курс досягає 200 осіб. На чолі з Маєвським О.О. і Долбнею В.Т. на кафедрі складається колектив з проблем промислової електроніки, що призводить до створення у 1963 році кафедри «Промислова електроніка». Розпочинається співробітництво зі спорідненою кафедрою Магдебурзького технічного інституту. Починає проводитися наукова робота з використання напівпровідникових засобів для управління електроприводами. У 1966 р. придбається ЕВМ «Наїрі-С» та створюється розрахунковий центр. Віктор Олександрович вважав виключно важливим для інженера і викладача мати добру практичну підготовку. Виконанню лабораторної роботи передувала збірка схем, захисту дипломної роботи – практика на заводі або у проектній організації, роботі викладачем – стажування у проектно-налагоджувальній організації або на виробництві. Це сприяло успішній роботі випускника і підвищенню авторитету кафедри.

З 1976 року по теперішній час завідувачем кафедри є **Володимир Борисович Клепіков**, її випускник 1961 року, і на момент виборання – доцент кафедри промислової електроніки, автор цієї статті.

Звичайно, за 43 роки кафедрою пройдено значний шлях. Його головні риси були відображені у роботах, опублікованих в інститутських Вісниках НТУ «ХПІ» серії «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», присвячених 75-ти і 85-ти річчям кафедри [4, 6]. Тому в даній статті автор вважає доцільним відмітити, лише на його думку, найбільш значущі події і результати роботи кафедри за основними її напрямами.

Підготовка науково-педагогічних кадрів. Викладачами, співробітниками та аспірантами кафедри було захищено 5 докторських: К. П. Власов (1980 р.), Л. В. Акімов (1989 р.), В. Б. Клепіков (1989 р.), А. І. Гуль (2003 р.), С. Г. Буряковський (2018 р.) та 51 кандидатська дисертація. Цьому сприяло створення у 1990 році при кафедрі спецради із захисту кандидатських, а у 1997 році – докторських дисертацій. Але треба відмітити і роль кафедри з цього напряму у, так би мовити, загальнодержавному аспекті.

В складний період занепаду економіки і наукових досліджень, пессимістичних настроїв її колектив став ініціатором і організатором у 1993 р. першої конференції з електроприводу, яка перетворилась у щорічну традиційну міжнародну конференцію «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (ПАЕП). Конференція стала школою обміну досвідом, апробації і розповсюдження нових наукових ідей і результатів: методів нечіткої логіки, нейронних мереж, генетичних алгоритмів, поліноміальних методів синтезу, наглядачів стану, векторного керування та багато

інших. На ній було висвітлено виключно важливу роль модернізації електропроводів як дуже ефективного засобу економії в Україні енергетичних ресурсів. Серед аспірантів став популярним конкурс докладів молодих вчених, який проводився за підтримкою німецької служби академічних обмінів (ДААД).

Кафедрі належить велика організаційна роль у проведенні 24-ох конференцій у яких приймали участь вчені і фахівці з 30 країн світу. Її учасниками було захищено 62 докторські і більше 160 кандидатських дисертацій, а труди конференції, деякі випуски которых досягали 600 сторінок, являють собою антологію електроприводу за минулі роки. Як наслідок згуртування учасників конференцій було рішення про створення у 1997 році Української асоціації інженерів електриків (УАІЕ). Визнанням заслуг кафедри стало обрання її завідувача Президентом асоціації, доцента В.М. Шамардіної – відповідальним секретарем і заснування у Харкові центрального органу асоціації.

Значну роль у підготовці кадрів вищої кваліфікації відіграє науковий семінар «Динаміка нелінійних електромеханічних систем», створений за підтримкою інституту електродинаміки НАН України (директор академік Кириленко О. В.). За роки функціонування семінару на його засіданнях було зроблено більше 200 докладів з тематики кандидатських і докторських робіт фахівцями ВУЗів, підприємств і організацій Харкова, Запоріжжя, Донецька Миколаєва, Кременчука, Одеси, Магдебурга та інших місць.

У вересні 2020 року під егідою IEEE буде проведена 25-а конференція, з наданням матеріалів і виступами на англійській мові, що відповідає вимогам на укометричної бази SCOPUS.

Наукова діяльність Важливим результатом слід вважати відкриття нового наукового напрямку внаслідок визнання спецрадою МЕІ у 1989 році докторської дисертації автора як «нового розділу теорії електропривода». За цим напрямом захищено 19 кандидатських дисертацій, а окремі теоретичні положення використані в 3-х докторських. У 1999 р. під час експериментальних досліджень було відкрито явище підсилення пружних коливань нелінійністю тертя, а у 2014 р. вийшла монографія Клепікова В.Б. «Динаміка електромеханічних систем з нелінійним тертям» (408 с.). Зараз за даним напрямом виконуються дослідження і розробки з підвищення безпеки руху в умовах буксування та юзу електромобілю. Ці роботи ведуться згідно держбюджетної теми № 3423 за планами МОН України. В них приймають участь: доц. Пшеничников Д.О., проф. Шамардіна В.М., ст. викл. А. В. Тимощенко, ас. Семіков О.В., аспіранти Сакун Є.В., Воробйов Б.В., Ротару А.В., інж. Кастрорний П.М.

Кафедрі належить ініціатива розпочатку (1994 р.) досліджень з використання нейронних мереж і генетичних алгоритмів для вирішення задач управління електромеханічними системами. В 1995 р. на Міжнародній науковій конференції у Санкт-Петербурзі з цього напрямку була зроблена перша в СНД доповідь, а у 1998 р. аспірантом кафедри Махотило К.В. була захищена перша в Україні кандидатська дисертація.

Досвід практичного використання цих методів передавався іншим кафедрам, одержав розвиток у дисертаційній роботі ст. викл. Обруча І.В., захищеної в 2019 р., а також у створені квазінейрорегулятора, які коефіцієнт котрого розраховуються аналітичним засобом.

Повернення на кафедру після закінчення роботи проректором д.т.н. проф. Долбні В.Т. надало імпульс використанню у дослідженнях і учебному процесі топологічних методів. У 2005 р. ним була видана монографія «Топологічні методи аналізу і синтезу електротехнічних та електромеханічних систем» (356 с.) дуже корисна для дослідників, аспірантів і студентів електроприводчиків.

Нестійкість електромеханічних систем з від'ємним тертям спонукала на пошуки методів усунення фрикційних автоколивань в подібних системах. У 90-ті роки розпочинаються активні дослідження з кореневих, поліноміальних методів синтезу систем, в тому числі, з наглядачами стану, що забезпечують стійкість і задані показники регулювання (Осичев О.В., Акімов Л.В., Котляров В.О.).

Гулем А.І. були виконані значні роботи по запропонованому ним методу мінімаксної оптимізації багатократно інтегруючих систем і захищена у 2003 р. докторська дисертація.

Глибокі дослідження ітераційних багатоканальних електроприводів слідкуючих систем були проведенні доц. Худяєвим О.А. у написаній ним докторській дисертації.

Актуальні наукові і важливі практичні дослідження з електромагнітної діагностики заземлювальних пристрій на протязі багатьох років проводить доц. Коліушко Д.Г. При цьому він забезпечує фінансування робіт за рахунок господоговорів, систематичні публікації результатів роботи і їх впровадження, що створює можливість завершення у найближчі роки докторської дисертації.

Велику роль по активізації досліджень і розробок з підвищення енергоефективності електроприводів відіграла виконана у 2007 – 2008 рр. науково-дослідна робота за планами НАН України «Розробка енергозберігаючих технологій модернізації електроприводів середньої і малої потужності в Україні». Було встановлено та звернено увагу на наявність мультиплікативного та синергетичного ефектів при модернізації і оптимізації електроприводів, їх надзвичайно велику роль у збереженні енергетичних ресурсів. Проведена робота по узагальненню досвіду ВУЗів та підприємств в цьому напрямку сприяла одержанню у 2016 р. колективом авторів Державної премії у галузі науки і техніки (першої в Україні з електроприводу).

Крім вищевказаних традиційно виконувалися наукові дослідження електроприводів під керівництвом ведучих викладачів за напрямками: верстатів з числовим програмним управлінням (проф. Аніщенко М.В.), підйомних механізмів (проф. Шамардіна В.М.), рельсовых транспортних засобів (проф. Кутовий Ю.М.), з моделювання електромеханічних систем (проф. Осичев О.В.), мобільних роботів та електромеханічних

систем із складними фрикційними зв'язками (доц. Котляров В.О.).

У період 2012 – 2019 років захистили кандидатські дисертації 8 викладачів та співробітників кафедри: Котляров В.О., Ткаченко А.О., Моісеєв О.М., Банев Є.Ф., Асмолова Л.В., Кунченко Т.Ю., Коротаєв П.О., Обруч І.В.

Наукова діяльність кафедри за останні 5 років знайшла відображення у 7 монографіях, 117 публікаціях, 45 доповідях на міжнародних конференціях.

Впровадження науково-технічних розробок. Зберігаючи традиції наших засновників і вчителів, вчені кафедри намагаються довести наукову роботу до практичного результату або впровадження. Завдяки цьому: для Криворізького металургійного заводу була розроблена система усунення буксування валків прокатного стану, Харківського станкозаводу – здійснено усунення внаслідок фрикційних явищ огранки валків при шліфуванні у 4-х важких вальцешліфувальних станках, виготовлених для Чехословаччини; Харківському авіазаводу передано аеродромне джерело живлення; інституту Радіоастрономії НАН України – електропривод з фрикційною муфтою скануючого пристрою. Для АО «Турбогаз» виготовлено і передано 4-и автономних джерела електроживлення за системою «Турбодетандер – асинхронний генератор – напівпровідниковий перетворювач».

На Харківському приборобудівному заводі імені Шевченко впроваджено у дослідну серію (50 од.) розробленого на кафедрі перетворювача частоти ПЧРТ-3 для енергоефективного електроприводу. Впровадження такого перетворювача на насосному агрегаті станції другого підйому у с. Солоніцевка, не тільки надало значний економічний ефект, а й привело до важливих теоретичних результатів – необхідності введення поняття «електромеханогідравлична система з розподіленими параметрами» і до висновку, що причиною поривів водопровідних мереж при включені агрегатів після короткочасної втрати напруги є хвильові процеси у водогінній мережі.

Під керівництвом доцента Коліушко Д.Г. щорічно виконуються господарчі договірні роботи у обсязі 150 – 250 тис грн. по підвищенню безпеки електрообладнання підприємств перевіркою заземлення.

Варто зазначити, що й в учебово-науковій роботі викладачі намагаються досягти практичного результату. Котляровим В.О. і А. Ткаченко А.О. разом із студентами створені мобільні роботи, що демонструються у «дні відкритих дверей» і приваблюють велику увагу школярів.

Для учебних і наукових цілей на базі автомобілю «Ланос» створено у 2015 році перший в Україні електропривод з суперконденсаторною батареєю.

Міжнародне співробітництво. Результати наукових досліджень кафедри неодноразово докладались на міжнародних конференціях в Україні, Росії, Німеччині, Франції, Італії, Угорщині, Польщі і в інших країнах, а у 24-х конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» приймали участь вчені і фахівці з 30-ти країн світу.

Найбільш плідними протягом багатьох років були зв'язки із спорідненою кафедрою Магдебурзького університету ім. Отто фон Геріке. Ще у 70-х роках там навчались у аспірантурі і захистили дисертацию Геродес Г.А. і Горохов А.Г. (керівник проф. Й. Фігель). Особливо активним було співробітництво за часи завідування кафедрою проф. Ф. Палісом. Він був постійним співголовою конференції ПАЕП і Головою журі конкурсу молодих вчених, який проводився за підтримкою німецької служби академічних обмінів (ДААД), приймав разом з нашою кафедрою активну участь з створення у ХПІ німецького технічного факультету і керував студентами, які щорічно від'їжджають на включене навчання.

В Магдебурзькому університеті у 1999 році, виконуючи за грантом ДААД експериментальні дослідження на лабораторній установці, автором було винайдено явище підсилення пружних коливань в електромеханічних системах нелінійстю тертя. Наукове співробітництво супроводжувалось сумісними публікаціями в Німеччині і Україні і доповідями на міжнародних конференціях.

У 2012 - 2014, 2015 - 2017р.р. кафедра приймала участь у виконанні Європроектів: спільно з ВУЗами Франції, Чехії, Росії, Австрії, Болгарії, Румунії, Іспанії. Активну участь у виконанні проектів приймали професори Клепіков В.Б., Аніщенко М.В., Кутовой Ю.М. доценти Пшеничников Д.О., Ткаченко А.О., ст. викл. Тимошенко А.В., інж. Крохмальов О.А., а в розробці методичних матеріалів з використанням лабораторії віддаленого доступу – професори Шамардіна В.М., Осичев О.В., доценти Котляров В.О., Асмолова Л.В.

В останні роки наукові стосунки активно розвиваються з Грузинським технічним університетом (зав. каф., д.т.н., проф. Чунашвілі Б.), спільно з яким проведено міжнародні конференції в Україні та Грузії, а також продовжуються з Технічним університетом Кафрінгії (Австрія) по вдосконаленню нетрадиційних методів проведення лабораторних робіт.

Учбово-методична робота. За роки свого існування кафедрою за всіма формами навчання підготовлено більше 6000 фахівців з вищою освітою в галузі електромеханічних систем автоматизації і електроприводу. Зміст навчання змінювався відповідно з технічним прогресом – від релейно-контакторного електроприводу до сучасних автоматизованих мікропроцесорних електромеханічних систем з використанням сучасних досягнень у напівпровідниковій техніці, електричних машинах, датчиків координат та інтелектуальних методів керування. Згідно з цим процесом вводилися нові курси або нові розділи в учбових планах, створювались і змінювались спеціалізації. У 90-ті роки поглиблюється комп’ютерна підготовка студентів, використання комп’ютерної техніки у наукових дослідженнях. На даному етапі кафедра веде підготовку за освітньою програмою «Електропривод, мехатроніка та робототехніка» в рамках 141-ої спеціальності «Енергетика, електротехніка та електромеханіка». Слід вказати, що «електромеханіка» була внесена у назву спе-

ціальності, зокрема, завдяки ініціативі нашої кафедри, УАЕ та підтримці ректорів університетів Загірняка М.В. (КрНУ), Грабко В.В. (ВНТУ), а також проректора Бешти О.С. (НГУУ), завідувачів кафедр Лозинського О.Ю., Пересади С.М., Садового О.В., і звернення безпосередньо до Міністра МОН України.

Щорічні наукові конференції ПАЕП відіграли значну роль у вдосконаленні роботи кафедр ВУЗів Украйни. Завершальним етапом кожної конференції було проведення засідання науково - методичної комісії з електромеханіки МОН України, довгий час головою якої був автор. Участь у засіданнях приймали ректори ВУЗів Загірняк М.В., Грабко В.В., представники міністерства Касatkіна Н.В., Солоденко А.К., завідувачі кафедр, представники НДІ і промисловості.

Створення Німецького технічного факультету у 2003 р., (декан проф. Шамардіна В.М.) дозволило використати систему включеного навчання з одержанням 2-х дипломів: НТУ «ХПІ» і Магдебурзького університету (щорічно 3-5 студентів).

У методичному забезпеченні учбового процесу – виданні учбових пособників, методичних матеріалів, підготовці нових курсів та розділів активну участь беруть професори: М.В. Аніщенко, В.М. Шамардіна, Ю.М. Кутової, Я.В. Щербак; доценти: Т.Ю. Кунченко, Л.В. Асмолова, Д.Г. Коліушко, Д.О. Пшеничников, І.О. Тукалов, О.А. Худяєвю

За останні 5 років було видано: 12 учбових посібників, 25 методичних матеріалів. В учбовому процесі студентів, магістрів і аспірантів широко використовуються монографії В.Т. Долбні «Топологічний аналіз і синтез електромеханічних систем», В.Б. Клепіков «Динаміка електромеханічних систем з нелінійним тертям, а також О.В. Осичева з моделювання електромеханічних систем.

Незважаючи на відомі труднощі з прийомом студентів на перший курс технічних спеціальностей, кафедра у останні 2 роки виконувала планові показники, повністю укомплектовуючи перший курс у обсязі 37 – 42 осіб тільки з першим пріоритетом, чому значною мірою сприяла наполеглива й відповідальна робота доц. Ткаченко А.О.

В учбовому процесі студентів дуже приваблює практична робота. На кафедрі під керівництвом доц. Котлярова В.О. активно працює студентський науково-технічний центр по створенню мобільних роботів, у якому приймають участь більше 25 студентів.

Протягом багатьох років команда студентів щорічно виїздить на другий тур української олімпіади з електромеханіки на котрих багаторічно студенти займають перші місця в особистому або командному зачіках.

Розвиток матеріальної технічної бази. У 80-ті роки завдяки підтримці випускників кафедри Жучкова М.І., заступника міністра промисловості СРСР та Дегавцова В.О., головного енергетика заводу «Серп і молот», була здійснена широка модернізація силового лабораторного обладнання і стендів.

Напередодні 75-річчя кафедри завдяки спонсорській допомозі, фіrm і організацій: «Тяжпромавтома-

тика» (дир. Кубишкін М.В.), «Тяжпромелектропроект» (Скидан М.Н.), «Елакс» (Кольчик І.І.) НПО «Електрощітовий завод» (Черенов О.М.), НПП «Компел» (Поліванов В.О.) було виконано євромонт кафедри, а фірмою «Сіменс» за виконання трьох господарських тем передано сучасне обладнання мікропроцесорної лабораторії з 10-ма комп'ютерами та сучасними електроприводами. Фірмою «Констар» було передано 4 лабораторних стенда з мікроконтролерами, фірмою «Компел» стенд із сучасними типами датчиків. Директор Харківської філії «Приватбанку» Терещенко А.І. передав кафедрі автомобіль «Ланос» для переобладнання його в електромобіль і використання в учебних і наукових цілях, на базі якого у 2015 році було створено електропривод з суперконденсаторною батареєю, у яку в гальмівних режимах здійснюється повернення енергії.

Суттєве покращення матеріально-технічної бази учебного процесу надала участь у виконанні 2-х раніше вказаних Європроекті: кафедра одержала сучасне комп'ютерне і лабораторне обладнання на суму близько 50 тис євро, а також мала можливість використати досвід закордонних ВУЗів Франції, Чехії, Болгарії, Росії, Австрії, відкрити спеціалізацію «Мехатроніка та робототехніка» і створити лабораторію віддаленого доступу, в тому числі, із зарубіжними країнами. Одержав розвиток науковий напрямок з електромобільного електроприводу і створено на базі автомобіля «Ланос» перший в Україні електромобіль з суперконденсаторною батареєю для учебних і наукових цілей.

В освоєнні обладнання лабораторії віддаленого доступу активну участь прийняли проф. М.В. Аніщенко, асистент А.В. Тимощенко, О.А. учебний майстер Крохмальов, а в методичному забезпеченні професори

В.М.Шамардіна, О.В. Осичев, доценти В.О. Котляров, А.О. Ткаченко, Л.В. Асмолова

Завдяки виконанню трьох бюджетних тем за планами МОН України були отримані обладнання і матеріали на суму близько 300тис. грн., в тому числі літій-залізо-фосфатні акумулятори, які встановлені на електромобілі для проведення експериментальних досліджень за дисертаційними роботами асистентом Семіковим О.В., аспірантами Сакуном Є.В., Воробйовим Б.В., Ротару А.В.

Серед важливих подій у житті нашої кафедри не можна не відмітити велику роботу з вшанування пам'яті Копняєва П.П. як засновника української електротехнічної школи. Ініціатива кафедри була одностайно підтримана членами асоціації УАІЕ. У 2011 році пам'ятний бюст професору Копняєву було встановлено у електротехнічному корпусі НТУ «ХПІ», побудованому завдяки ініціативі Павла Петровича його народженості і безпосередній участі у проектуванні та вирішенні непростих питань будівництва.

На даний час кафедра має у своєму складі 3 докторів і 15 кандидатів наук, в тому числі, 7 професорів, 11 доцентів. В аспірантурі навчається 7 аспірантів. За денною формою на ступінь бакалавра та магістра навчається 212 студентів.

Слід вказати й на проблеми з якими зустрічається кафедра у своїй роботі. По-перше, з 4-го курсу багато студентів починає працювати, що призводить до пропусків занять з усіма витікаючими наслідками. По-друге, суттєве скорочення фінансування держбюджетної тематики і вкрай мале господарської, знижує зацікавленість у науковій роботі. Особливо заважає зростання бюрократизації: безперервна зміна спеціальностей, спеціалізацій, учебних планів, форм підготовки



Колектив кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи» в ювілейний рік біля пам'ятника професору Копняєву П.П. Зліва направо: **1 ряд:** інж. Долгушева Л.М., зав. лабор. Шаповалова І.О., проф. Аніщенко М.В., заст.зав.каф., проф. Шамардіна В.М., зав.каф., проф. Клепіков В.Б., проф. Долбня В.Т., заст. директора ННІ "ЕЕЕ", доц. Воінов В.В., проф. Кутовий Ю.М., проф. Щербак Я.В. **2 ряд:** асп. Кириленко Я.О., проф. Осичев О.В., доц. Ткаченко А.О., доц. Худяєв О.А., інж. Єрмакова І.В., інж. Крохмальов О.А., доц. Ковальов В.М., доц. Кунченко Т.Ю., ст. викл. Обруч I.В., майстер вироб. навч. Кастрорний П.М., інж. Панська Г.В., ст. викл. Тищенко Л.В., доц. Асмолова Л.В., асис. Семіков О.В., ст. викл. Тимощенко А.В. **3 ряд:** доц. Котляров В.О., доц. Коліушко Д.Г., доц. Тукалов І.О., асп. Воробйов В.В., доц. Пшеничников Д.О.

фахівців вищої кваліфікації; реорганізаційні заходи; підлайджування під зарубіжні форми навчання; підвищення обсягу паперових матеріалів, що супроводжується учебовий процес та функціонування кафедри. Все це потребує ретельного розгляду компетентними фахівцями стану підготовки з вищої технічної освіти.

У непростій роботі завідувача кафедри авторові надавали суттєву допомогу заступники: доц. Богданова Б.В., Осичев О.В., Кутовой Ю.М., Шамардіна В.М., на яку в останні роки припадає значний обсяг учебово-організаційної роботи. Вважаю за необхідне також від мітити викладачів та співробітників кафедри, яким доводиться виконувати багатообсяжну організаційно-технічну роботу по забезпеченню функціонування кафедри: ст. викл. Л.В. Тищенко, зав. лаб. І.О. Шаповалова, інженери Г.В. Панська, Л.М. Долгушева, І.В. Еромакова.

Пам'ятаючи слова президента НАН України Петона Б.Є. виказані у привітанні з нагоди 75-річчя кафедри: «Колектив кафедри в наш непростий час зберігає професіоналізм та вміння долати труднощі», колектив кафедри з оптимізмом дивиться у майбутнє.

Список літератури

1. Stanford University. URL: <https://www.stanford.edu> (дата звернення 23.12.2019).
2. Киркач Н.Ф. Харьковский политехнический институт. 1885-1985. История развития / Под ред. Н.Ф. Киркача. Харьков: Вища школа, 1985. 223 с.
3. Лисачук Г.В., Товажнянский Л.Л., Шептун И.М. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» / Под общ. ред. Л.Л. Товажнянского. Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. 119 с.
4. Клепиков В.Б. Из истории кафедры (к 75-летию кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ»). Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Харків: НТУ «ХПІ», 2005, №45. С. 15 – 19.
5. Тверитникова О.Є. Зародження і розвиток науково-технічної школи електротехніки професора П.П. Копняєва (1885-1950 р.р.): монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2010. 211 с.
6. Клепиков В.Б. Из истории научной школы электропривода Харьковского Политехнического Института. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Харків: НТУ «ХПІ», 2010, Вип. 28. С. 13-28.
7. Брок О.Б., Бзлькінд Л.Д., Штурман Г.І. і dr. Pavel Petrovich Kopnyayev [Pavel Petrovich Kopnyayev]. Elektrichestvo [Electrical Technology Russia]. Moskva: Gosenergoizdat, 1957, №5. p. 92.
8. Hubenko T.P. Tvorets novoi shkoly [Creator of a new school]. Politehnika [Polytechnic]. URL: <http://polytechnic.kpi.kharkov.ua/ViewArticle.asp?id=3087>. (accessed 15.01.2020).
9. Bardachevskyi A., Hubenko V., Denis B., Onyshko Ye. 1896-1996. Tykhon Pavlovych Hubenko. Zhyttia i diialnist [1896-1996. Tikhon Pavlovich Gubenko. Life and activity]. Elektromekhanika [Electromechanics]. Lviv-Slavsk: DU Lvivska politeknika, 1996. pp. 9 – 11.
10. YUn'kov M.G. OAO «Elektroprivod» (VNIIElektroprivod) – nauchno-proizvodstvennaya shkola po elektroprivodu: seminar «80 let otechestvennoj shkoly elektroprivoda» [Ltd «Electroprivod» - scientific production school on electric drives: seminar «80 years of the domestic school of electric drive»]. Sankt-Peterburg: LETI, 2002. pp. 5 – 7.
11. Клепиков В.Б., Тверитникова О.Є. Profesor P.P. Korniaiev – vchenyi, hromadskyi diiach, orhanizator vyschoi elektrotekhnichnoi osvity (do 150 richchia z dnia narodzhennia) [Professor P. Korniaiev - scientist, public figure, organizer of higher electrical engineering education (up to 150 anniversary birthday)]. Elektrotekhnika i elektromekhanika. [Electrical engineering and electromechanics]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, №14. pp.11 – 16.

References (transliterated)

1. Stanford University. URL: <https://www.stanford.edu> (accessed 23.12.2019).
2. Kirkach N.F. *Har'kovskij politekhnicheskij institut. 1885-1985. Istorya razvitiya* [Kharkov polytechnical institute. 1885-1985. History of development] / red. N.F. Kirkacha. Har'kov: Vishcha shkola, 1985. 223 p.
3. Lisachuk G.V., Tovazhnyanskij L.L., SHeptun I.M. *Nacional'nyj tekhnicheskij universitet «Har'kovskij politekhnicheskij institut»* [National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute】 / red. L.L. Tovazhnyanskogo. Har'kov: NTU «HPI», 2003. 119 p.
4. Klepikov V.B. *Iz istorii kafedry (k 75-letiyu kafedry «Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy» NTU «HPI»)* [From the history of the department to the 75th anniversary of the department "Automated Electromechanical Systems" NTU "KhPI"]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi institut». Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoriia i praktyka [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2005, №45. pp. 15 – 19.
5. Tveritnykova O.Ye. *Zarodzhennya i rozvytok naukovo-tehnichnoi shkoly elektrotekhniki profesora P.P. Kopnyayeva (1885-1950 r.r.): monohrafiia* [Origin and development of professor P.P. Kopnyayev the scientific and technical school of electrotechincscs (1885-1950): monograph]. Kharkiv, NTU «KhPI», 2010. 211 p.
6. Klepikov V.B. Iz istorii nauchnoj shkoly eletroprivoda Har'kovskogo Politekhnicheskogo Instituta [From the history of electric drive the scientific school of the of the Kharkov Polytechnic Institute]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi institut». Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoriia i praktyka [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2010, Vyp.28. pp. 13 – 28.
7. Brok O.B., Bzl'kind L.D., SHturman G.I. i dr. Pavel Petrovich Kopnyayev [Pavel Petrovich Kopnyayev]. Elektrichestvo [Electrical Technology Russia]. Moskva: Gosenergoizdat, 1957, №5. p. 92.
8. Hubenko T.P. Tvorets novoi shkoly [Creator of a new school]. Politehnika [Polytechnic]. URL: <http://polytechnic.kpi.kharkov.ua/ViewArticle.asp?id=3087>. (accessed 15.01.2020).
9. Bardachevskyi A., Hubenko V., Denis B., Onyshko Ye. 1896-1996. Tykhon Pavlovych Hubenko. Zhyttia i diialnist [1896-1996. Tikhon Pavlovich Gubenko. Life and activity]. Elektromekhanika [Electromechanics]. Lviv-Slavsk: DU Lvivska politeknika, 1996. pp. 9 – 11.
10. YUn'kov M.G. OAO «Elektroprivod» (VNIIElektroprivod) – nauchno-proizvodstvennaya shkola po elektroprivodu: seminar «80 let otechestvennoj shkoly elektroprivoda» [Ltd «Electroprivod» - scientific production school on electric drives: seminar «80 years of the domestic school of electric drive»]. Sankt-Peterburg: LETI, 2002. pp. 5 – 7.
11. Klepikov V.B., Tveritnikova O.Ie. Profesor P.P. Korniaiev – vchenyi, hromadskyi diiach, orhanizator vyschoi elektrotekhnichnoi osvity (do 150 richchia z dnia narodzhennia) [Professor P. Korniaiev - scientist, public figure, organizer of higher electrical engineering education (up to 150 anniversary birthday)]. Elektrotekhnika i elektromekhanika. [Electrical engineering and electromechanics]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, №14. pp.11 – 16.

Надійшла 31.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клепіков Володимир Борисович (Клепіков Владимиr Борисович, Klepikov Vladimir Borisovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: klepikov@kpi.kharkov.ua

В. В. ГРАБКО, О. В. ДІДУШОК

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ ЗНОСУ КОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ПРИ КОМУТАЦІЇ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА

У роботі розглянуто переваги застосування вакуумних комутаційних апаратів та особливості використання електромагнітної защіпки у якості приводного механізму. Описано вплив замикання (вимкнення) та розмикання (вимкнення) силових контактів на зношення контактної системи вимикача. Розглянуто фізичні процеси у контактних з'єднаннях, які виникають при комутації вакуумного вимикача та їх вплив на зношення контактної системи. При коротких замиканнях можливе зварювання контактів у замкнутому положенні та вигоряння і оплавлення при їх відключені. Розроблена математична модель дозволяє визначати знос комутаційної системи при вимкненні та вимкненні вакуумного вимикача. При замиканні силових контактів вимикача враховується загальна електродинамічна сила відкіду контактів по кожному із полюсів силового агрегату. При вимкненні знос силових контактів визначається на основі порівняння діючого тягового зусилля вимкнення із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу вимкнення вакуумного вимикача. Якщо різниця зусилля при вимкненні відрізняється менше, ніж на задане значення δ від загального електродинамічного зусилля відкіду контактів або величина діючого тягового зусилля при вимкненні відрізняється менше ніж на задане значення σ від мінімально допустимого тягового зусилля вимкнення формується сигнал зносу контактної системи вакуумного вимикача. Застосування за-пропонованої математичної моделі дозволить своєчасно попереджувати обслуговуючий персонал про зношення контактної системи із-за дугових процесів, які виникають у дугогасильній камері вакуумного вимикача.

Ключові слова: математична модель, контакт, знос, комутація, діагностування, вакуумний вимикач.

В. В. ГРАБКО, О. В. ДІДУШОК

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗНОСА КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ КОММУТАЦИИ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

В работе рассмотрена роль вакуумных выключателей среди коммутационных аппаратов среднего напряжения. В работе рассмотрены преимущества применения вакуумных коммутационных аппаратов, и особенности использования электромагнитной защелки в качестве приводного механизма. Описано влияние замыкания (включение) и размыкания (выключение) силовых контактов на износ контактной системы выключателя. Рассмотрены физические процессы в контактных соединениях, которые возникают при коммутации вакуумного выключателя и их влияние на износ контактной системы. При коротких замыканиях возможно сварка контактов в замкнутом положении и выгорания и оплавления при их отключении. Разработанная математическая модель позволяет определять износ коммутационной системы при включении и выключении вакуумного выключателя. При замыкании силовых контактов выключателя учитывается общая электродинамическая сила отката контактов по каждому из полюсов силового агрегата. При включении износ силовых контактов определяется на основе сравнения действующего тягового усилия включения с общей электродинамической силой отката по всем полюсам контактной системы. При отключении износ силовых контактов определяется на основе сравнения действующего приводного тягового усилия выключения с минимально допустимым тяговым усилием для процесса отключения вакуумного выключателя. Если разница усилия при включении отличается менее чем на заданное значение δ от общего электродинамического усилия отката контактов или величина действующего тягового усилия при выключении отличается менее чем на заданное значение σ от минимально допустимого тягового усилия выключения формируется сигнал износа контактной системы вакуумного выключателя. Применение предложенной математической модели позволит своевременно предупреждать обслуживающий персонал об износе контактной системы из-за дуговых процессов, которые возникают в дугогасительной камере вакуумного выключателя.

Ключевые слова: математическая модель, контакт, износ, коммутация, диагностирования, вакуумный выключатель.

V. V. HRABKO, O. V. DIDUSHOK

MATHEMATICAL MODEL OF DETECTION OF WEAR OF A CONTACT SYSTEMS WHEN SWITCHING A VACUUM SWITCH

The paper considers the role of vacuum circuit breakers among medium voltage switching devices. The paper discusses the advantages of using vacuum switching devices and the features of the use of an electromagnetic latch as a drive mechanism. The influence of the circuit (on) and the opening (off) of the power contacts is described in the wear of the contact system of the switch. Consider the physical processes in contact contacts that occur during switching of the vacuum switch and their influence on contact system wear. In the short-circuit mode, the contacts can be welded in the closed position and there may be burning and melting the contacts when they are disconnected. The developed mathematical model makes it possible to determine the wear of the switching system when the vacuum switch is turned on and off. When the circuit breakers are closed, the total electrodynamic force of the contacts for each of the poles of the power unit is taken into account. When enabled, the wear of the power contacts is determined on the basis of a comparison of the current traction effort of inclusion with the total electrodynanic force of the rejection over all contact system poles. When disconnected, the wear of the power contacts is determined on the basis of a comparison of the driving traction effort with the minimum allowable traction effort for the process of switching off the vacuum switch. If the difference in force when the switching is differs by less than the specified value δ from the total electrodynanic force of the contact rejection or the current tractive power when switched off differs by less than the specified value σ of the minimum permissible traction effort, switch contact system wear signal. The application of the proposed mathematical model will allow the service staff to be warned in a timely manner about the wear of the contact system due to the arc processes that arise in the arc-vacuum chamber of the vacuum circuit breaker.

Key words: mathematical model, contact, wear, switching, diagnosing, vacuum circuit breaker.

Вступ. В останні роки відзначається інтенсивне використання вакуумних вимикачів середньої напруги в електропостачанні промислових підприємств України. Вакуумна комутаційна техніка має ряд переваг: висока швидкодія, вибухо- і пожежобезпечність, екологічна чистота, широкий температурний діапазон експлуатації, мінімальні експлуатаційні витрати, висока зносостійкість при комутації струмів навантаження та номінальних струмів порівняно із іншими типами комутаційної техніки, підвищена стійкість до ударних і вібраційних навантажень, мінімальні габаритні розміри. У вакуумних вимикачах застосовують переважно електромагнітний привід, який надійніший від пружинного. Пружинний привід має складну конструкцію і, як наслідок, необхідність більш частого і кваліфікованого обслуговування. Конструкція електромагнітних приводів така, що застосування безпосереднього з'єднання силового елемента приводу з рухомими контактами дугогасильної камери через тяговий ізолятор є простою та ефективною кінематичною схемою, підвищується надійність роботи приводу, але в той же час це призводить до зниження ремонтопридатності. За рахунок заміни механічної защіпки на магнітну зменшується тертя рухомих частин, які не вимагають періодичного застосування мастила. Застосування у при-водах вакуумних вимикачів невеликої кількості деталей дозволяє протягом всього терміну експлуатації і без проведення експлуатаційних, ремонтних та профілактичних робіт підвищити надійність роботи вимикача в цілому і збільшити ресурс механічної стійкості.

Контактна система вакуумних вимикачів поміщенна у вакуум, електрична міцність якого у багато разів вище, ніж повітря при атмосферному тиску. Гасіння дуги відбувається при першому переході струму через нуль за рахунок дифузії заряджених частинок із області дуги в навколоїшній простір. Запалюється дуга внаслідок іонізації парів металевих контактів [1]. При розмиканні контактів перетин контактних майданчиків зменшується, опір і температура збільшуються, відбувається розплавлення і випаровування металу. Для зменшення зносу розробники вакуумних вимикачів прагнуть в контактній системі вимикача застосовувати тугоплавкі метали. Оскільки оптимального матеріалу для контактів не знайдено їх виготовляють із різних сплавів. Для зменшення зносу при комутації вимикача контакти виготовляють у вигляді спеціальних конструкцій. Перелічені заходи не завжди призводять до зменшення зносу силових контактів, тому дослідження ступеня зносу силових контактів є актуальною задачею.

У роботі [2] розроблена модель розрахунку граничного струму зварювання контактів вакуумного вимикача. Дано модель зручна для аналізу теплових процесів та розрахунку граничного струму зварювання, але не може бути застосована у задачах діагностування ступеню зносу контактної системи. Запропонований спосіб випробування вакуумних вимикачів на стійкість при струмах короткого замикання, що представлено у роботі [3], дозволяє підвищувати надійність роботи вакуумного вимикача.

Представленій спосіб складний у реалізації і має низьку точність вимірювання. У роботі [4] авторами описано вплив зміщення розташування елементів контактної пари на комутацію вакуумного вимикача. У роботі [5] запропоновано використовувати силу утримання приводу, як критерій оцінки основних характеристик вакуумних вимикачів. Даний спосіб не може бути застосований для електромагнітного приводу вакуумних вимикачів із магнітною защіпкою, оскільки привод утримується у крайніх положеннях магнітною защіпкою із фіксованою силою утримання. Автори у роботах [6,7] пропонують здійснювати аналіз механічних процесів у вакуумних вимикачах із врахуванням електродинамічної сили, але лише для процесу ввімкнення вакуумного вимикача. У роботі [8] представлено розрахунок динамічних характеристик вимикача із врахуванням електродинамічних сил відкиду силових контактів. Автор у роботі [9] детально описує дуговий процес, який протікає при комутації вакуумного вимикача, але не оцінює його вплив на подальшу експлуатацію контактної пари. У роботі [10] представлено методи обчислення напруги відновлення перехідних процесів при комутаціях вакуумних вимикачів, але не враховано первинні дугові процеси, які мають більший вплив на роботу контактної системи.

Метою роботи є розробка математичної моделі для виявлення та попередження зношення контактної системи вакуумного вимикача під час комутації, що дозволить підвищити надійність роботи вакуумного вимикача в цілому.

Результати дослідження. Роботоздатність комутуючих контактів характеризується процесами при їх замиканні (ввімкнення) та розмиканні (вимкнення). При комутації вимикача відбувається знос силових контактів. Під зносом контактів розуміють руйнування робочих поверхонь силових контактів, що приводить до зміни їх форми, розміру, маси і до зменшення провалу. У більшості випадків електричний знос контактів (електрична ерозія) більший від зносу, який спричинений механічним факторами. Знос має місце як при розмиканні, так і при замиканні.

При розмиканні сила, що стискає контакти, знижується до нуля, різко зростають перехідний опір контакту і щільність струму в місці контакту. В місці контакту збільшується температура, і між розмикаючими контактами утворюється контактний перешкідок із розплавленого металу, який в подальшому розривається. При цьому в проміжку між контактами можуть виникнути різні форми електричного розряду. При напрузі і струмі, більших мінімально необхідних виникає дуговий розряд. Якщо струм менший мінімально необхідного, а напруга вище напруги запалювання дуги, то виникає іскровий розряд. Вплив електричної дуги в процесі відключення контактів призводить до ерозійного руйнування контактів. Інтенсивність руйнування контактів залежить від багатьох факторів – струм відключення, час горіння дуги,ластивості контактного матеріалу.

При замиканні вимикача відстань між контактними поверхнями поступово зменшується.

При деякій відстані між ними відбувається пробій, виникає дуга, яка гасне при замиканні контактів. Знос від цього явища слід враховувати в апаратах на середню та високу напругу. Він викликаний вібрацією контактів, що виникає при замиканні. Рухомий контакт підходить до нерухомого з певною швидкістю. При зіткненні відбувається пружна деформація матеріалу обох контактів. Вібрація при замиканні можлива унаслідок удару при втягуванні якоря. Знос при цьому може бути більшим, ніж від удару самих контактів, оскільки вібрація контактів відбувається при набагато більших миттєвих значеннях струму.

Важливою є робота контактної системи вимикача при короткому замиканні. При коротких замиканнях виникають важкі умови роботи як для замкнутих, так і для комутуючих контактів. При коротких замиканнях присутня небезпека зварювання контактів при знаходженні їх у замкнутому положенні (у випадку наскрізного струму короткого замикання) і тим більше в момент замикання (включення на коротке замикання). При короткому замиканні має місце не тільки різке збільшення струму, але й збільшення переходного опору контакту через ослаблення контактного натиснення, що викликається електродинамічними силами. Теплова енергія, що виділяється в місці контакту різко зростає і може викликати зварювання контактів. Зварювання замкнутих контактів відбувається за рахунок електродинамічного відкиду, коли електродинамічні сили дорівнюють або перевищують контактне натискання. Дуга, що виникає при відкиді контактів, викликає значне оплавлення робочих поверхонь і їх зварювання при замиканні. При вмиканні на коротке замикання вірогідність зварювання контактів зростає як за рахунок можливої вібрації, так і меншого приводного зусилля. При відключені струмів короткого замикання контакти вигоряють і оплавляються.

Дуга у вакуумі існує за рахунок іонізації парів контактного матеріалу і її характеристики визначають перш за все властивості матеріалів електродів. Характер протікання процесів залежить від властивостей матеріалу електродів і їх конструктивних особливостей. Дуга у вакуумі горить поки на електродах виділяється енергія, достатня для підтримання в міжконтактному проміжку концентрації парів металу, при якому може існувати дуговий розряд. При підході струму до нульового значення енергія, яка виділяється на електродах різко зменшується і дуга згасає до переходу струму через нульове значення. В роботі [11] наведено залежність енергії дуги від струму відключення для різних матеріалів контактів, рисунок 1.

Для мідних торцевих контактів (крива 1) та сплаву мідь-вольфрам (крива 2) дифузна форма дуги зберігається при струмі до 5 кА. Енергія, що виділяється при горінні дуги, зростає плавно. При збільшенні струму більше 5,5÷6 кА виникає стрибкоподібно стисла дуга, яка характеризується різким збільшенням енергії дуги та ерозією контактів. Границний струм переходу дуги з одного стану в інший залежить від матеріалу, геометричної форми і розмірів контактів, а також від швидкості зміни струму.

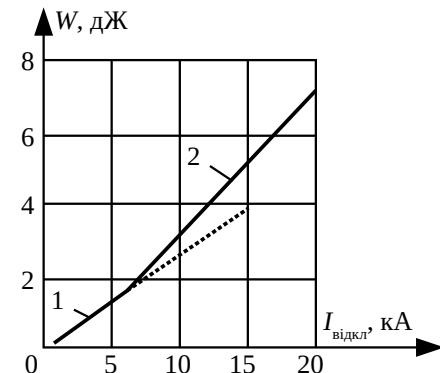


Рис. 1. Залежність енергії яка виділяється в дузі від відключаючого струму у вакуумі

Дифузна дуга у вакуумі існує у вигляді декількох паралельних дуг одночасно, через кожну з яких може протікати струм від декількох десятків до декількох сотень ампер. При цьому катодні плями відштовхуються одна від одної і прагнуть охопити всю контактну поверхню.

При збільшенні струму сили електромагнітної взаємодії долають сили відштовхування і відбувається злиття окремих дуг в один канал, що призводить до різкого збільшення розмірів катодної плями. Внаслідок цього з'являються значні труднощі гасіння дуги або відбувається повна відмова камери. Тому виробники створюють конструкцію камери такою, щоб дуга існувала у дифузній формі або час дії стислої дуги був мінімальний. Це досягається створенням радіальних і аксіальних магнітних полів, які забезпечують переміщення опорних точок дуги із високою швидкістю по електродах.

Для отримання поперечних радіальних і поздовжніх аксіальних магнітних полів розроблені різні конструкції контактних систем. У вакуумних камерах на номінальну напругу 10 кВ та номінальні струми відключення до 50 кА застосовують контактні системи із поперечним радіальним магнітним полем (рис. 2,б). Контактні системи із спіральними «пелюстками» мають форму дисків із розрізаними спіральними пазами на сегменти, які з'єднані у центральній частині контакту. При розмиканні контактів дуга під дією електродинамічних сил, що виникають із викривленням контуру струму, переміщується на периферійні ділянки контактів. При цьому у металевих прорізях створюється радіальне магнітне поле під впливом якого дуга переміщується по периферійних ділянках контактів. У дисках із розрізами виникає радіальне магнітне поле під впливом якого дуга переміщується по периферійних ділянках із високою швидкістю, що не викликає появи великих розплавлених зон на електродах. Зі збільшенням струму більше 50 кА дуга розпочинає розплавлювати крайні частини спіральних дисків. Тому даний тип контактної системи застосовують на струми до 50 кА.

Контактні системи із поздовжнім магнітним полем (рис. 2,а) дозволяють комутувати струми до 200 кА. Створення аксіального паралельного магнітного поля не дає можливості дугам з'єднатися, що дозволяє зберегти дугу у дифузному стані.

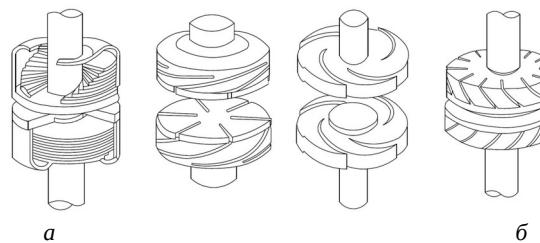


Рис. 2. Типи контактної системи вакуумного вимикача:
а – контактна система із поздовжнім магнітним полем;
б – контактна система із поперечним магнітним полем

Струм від центрального струмопроводу розтікається по радіальному розташуванню струмопровідним пластинам, що закінчуються на периферії провідниками кільцевої форми. Це створює один виток, через який протікає струм відключення. Кінці цих кільцевих дуг з'єднуються безпосередньо з електродом, на якому і відбувається процес виникнення і гасіння дуги. Контактуючі поверхні електродів мають радіальні прорізи, які перешкоджають злиттю дуг.

На рисунку 3 представлено залежність струму відключення від діаметрів контактів вакуумного вимикача для різних типів контактної системи. Рисунок підтверджує область застосування контактної системи із поперечним магнітним полем на відключаючі струми до 50 кА, а для контактної системи із поздовжнім магнітним полем на відключаючі струми до 200 кА.

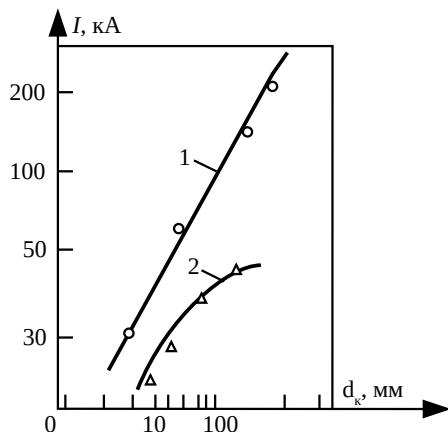


Рис. 3. Залежність відключаючої спроможності вакуумної камери вимикача від діаметра контактів:
1 – контакти із повздовжнім магнітним полем;
2 – контакти із поперечним магнітним полем

Незважаючи на технічні рішення виробників вакуумних комутаційних апаратів при конструюванні контактної системи, торцеві контакти мають недостатню динамічну стійкість. При великих струмах виникає відкід контактів, викликаний силами звуження ліній струму у контактах та вибух контактного містка. При протіканні великого струму контактний місток нагрівається до високої температури і переходить у пароподібний стан. Цей пар створює тиск, який відкидає контакти. Процеси плавлення і зварювання контактів досліджаються переважно експериментальним шляхом і за результатами вимірювань кінцевих значень досліджуваних параметрів.

Зауважимо при аналітичному розрахунку важко враховувати вплив ряду факторів на процес зварювання контактів – роль поверхневих плівок контактів, зміна властивостей матеріалу при швидкій зміні струму та інші [12].

Отже, постає завдання розробки математичної моделі виявлення рівня зносу комутаційної системи при комутації вакуумного вимикача із електромагнітним приводом.

Розглянемо рівняння електричного кола обмотки електромагніта вакуумного вимикача [13]:

$$u = i \cdot R_a + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

де u – напруга живлення обмотки електромагніту;
 i – миттєве значення струму в обмотці електромагніту;

R_a – активний опір обмотки;

Ψ – миттєве значення потозчеплення обмотки;

t – час.

Рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$\frac{d\Psi}{dt} = u - i \cdot R_a. \quad (2)$$

Домноживши рівняння (1) на вираз idt , отримуємо рівняння енергетичного балансу:

$$u \cdot idt = i^2 \cdot R_a dt + i \cdot d\Psi. \quad (3)$$

В будь-який момент часу t справедливе рівняння:

$$\int_0^t u \cdot idt = \int_0^t i^2 \cdot R_a dt + \int_0^\Psi id\Psi, \quad (4)$$

де $\int_0^t u \cdot idt$ – електрична енергія джерела живлення;

$\int_0^t i^2 \cdot R_a dt$ – втрати енергії в активному опорі обмотки електромагніту;

$\int_0^\Psi id\Psi$ – енергія, що затрачена на створення магнітного поля.

Відповідно до закону збереження енергії, енергія отримана магнітним полем при елементарному переміщенні якоря, визначається механічною роботою здійсненою якорем, і зміною запасу електромагнітної енергії:

$$i \cdot d\Psi = F_t dx + dW_m, \quad (5)$$

де $i \cdot d\Psi$ – елементарна енергія отримана полем при переміщенні якоря;

$F_t dx$ – елементарна робота, що здійснена якорем;
 dW_m – приріст магнітної енергії;

x – переміщення якоря;

F_t – тягове зусилля якоря.

Із рівняння (5) отримуємо:

$$F_t = i \cdot \frac{d\Psi}{dx} - \frac{dW_m}{dx}. \quad (6)$$

Відомо [13], що енергія магнітного поля:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot i \cdot \Psi. \quad (7)$$

Враховуючи рівняння (7) та умови при яких втрати на гістерезис відсутні, магнітопровод магнітної системи електромагніту ненасичений, рівняння (6) можна записати:

$$F_t = i \cdot \frac{d\Psi}{dx} - \frac{1}{2} \cdot \Psi \cdot \frac{di}{dx} - \frac{1}{2} \cdot i \cdot \frac{d\Psi}{dx}. \quad (8)$$

Зважаючи, що струм i обмотки електромагніту при елементарному переміщенні dx не змінюється, вираз тягового зусилля (8) буде мати вигляд:

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot i \cdot \frac{d\Psi}{dx}. \quad (9)$$

Швидкість руху V якоря є похідною від його переміщення x , яка залежить від часу:

$$V = \frac{dx}{dt}. \quad (10)$$

Рівняння (10) можна записати у вигляді:

$$dx = V \cdot dt. \quad (11)$$

Із врахуванням (11) рівняння тягового зусилля (9) запишеться:

$$F_t = \frac{i}{2 \cdot V} \cdot \frac{d\Psi}{dt}. \quad (12)$$

Проходження струмів короткого замикання та близьких до них через замкнуті контакти або ті, що замикаються супроводжується різким збільшенням температури в контактній площині і виникненням електродинамічного зусилля відкиду, що може привести до зварювання контактів або самовільного розмикання контактів вимикача. Електродинамічна сила відкиду має найбільший вплив на процес ввімкнення та стійкість при проходженні струмів близьких до короткого замикання у замкнутому положенні. Збільшення цієї сили порівняно із тяговим зусиллям при ввімкненні характеризується сильним зносом контактної системи та оплавленням контактів. Тому для надійної роботи контролю електродинамічної сили відкиду при замиканні вакуумного вимикача є важливою задачею. Електродинамічне зусилля відкиду визначається [13]:

$$F_{ed} = 10^{-7} \ln \frac{r_k}{r_o} \quad (13)$$

де i – струм, що протікає через комутуючі контакти; r_k – радіус комутуючого контакту; r_o – радіус металевого перешийка в контакті вимикача.

На рисунку 4 зображені напрямки електродинамічного зусилля протиції замкнутим контактам, при протіканні струмів через контактну систему вимикача.

При зміні перерізу провідника лінії струму змінюються і виникає поздовжня сила F_{ed} , що може розрвати місце переходу вздовж осі двох контактів.

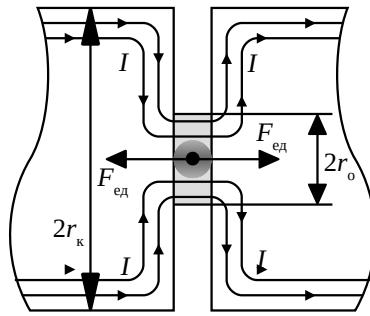


Рис. 4. Електродинамічні сили в замкнутих контактах при протіканні струму

Розглянемо математичну модель діагностування силових контактів при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача. Для процесу замикання силових контактів (задіяна обмотка ввімкнення) рівняння (2) зміниться відповідно до вимірюваних значень при ввімкненні вимикача:

$$\frac{d\Psi_{ob.vvim}}{dt} = u_{ob.vvim} - i_{ob.vvim} \cdot R_{ob.vvim}. \quad (14)$$

Швидкість ввімкнення згідно рівняння (10) для процесу ввімкнення вакуумного вимикача буде мати вигляд:

$$V_{vvim} = \frac{dx}{dt}. \quad (15)$$

Рівняння тягового зусилля (12) при ввімкненні вакуумного вимикача:

$$F_{t.vvim} = \frac{i_{ob.vvim}}{2 \cdot V_{vvim}} \cdot \frac{d\Psi_{ob.vvim}}{dt}. \quad (16)$$

Розглянемо розрахунок загальної електродинамічної сили відкиду для усієї контактної системи із врахуванням кожного полюса (полюси А, В, С):

$$F_{ed.zar} = 10^{-7} i_A^2 \ln \frac{r_{k.A}}{r_{o.A}} + 10^{-7} i_B^2 \ln \frac{r_{k.B}}{r_{o.B}} + 10^{-7} i_C^2 \ln \frac{r_{k.C}}{r_{o.C}}. \quad (17)$$

де i_A, i_B, i_C – миттєве значення струму, який протікає через полюси А, В, С вакуумного вимикача відповідно;

$r_{k.A}, r_{k.B}, r_{k.C}$ – радіус комутуючих контактів в кожному із полюсів А, В, С вакуумного вимикача відповідно;

$r_{o.A}, r_{o.B}, r_{o.C}$ – радіус металевого перешийка контакту в кожному із полюсів А, В, С вакуумного вимикача відповідно.

Аналогічні процеси можна описати для процесу розмикання силових контактів. Рівняння (2) для процесу вимкнення вакуумного вимикача буде мати вигляд:

$$\frac{d\Psi_{ob.vim}}{dt} = u_{ob.vim} - i_{ob.vim} \cdot R_{ob.vim}. \quad (18)$$

Рівняння (10) для процесу вимкнення вакуумного вимикача:

$$V_{vim} = \frac{dx}{dt}. \quad (19)$$

Рівняння тягового зусилля (12) при вимкненні вакуумного вимикача (задіяна обмотка вимкнення):

$$F_{\text{т.вим}} = \frac{i_{\text{об.вим}}}{2 \cdot V_{\text{вим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt}. \quad (20)$$

Порівнюючи діюче тягове зусилля та загальну електродинамічну силу відкиду контактів при замиканні і діюче тягове зусилля із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу розмикання, можна отримати виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача. Якщо величина діючого тягового зусилля при ввімкненні відрізняється менше, ніж на задане значення δ від загального електродинамічного зусилля відкиду контактів або величина діючого тягового зусилля при вимкненні відрізняється менше, ніж на задане значення σ від мінімально допустимого тягового зусилля вимкнення, то формується сигнал виявлення зносу силових контактів контактної системи вимикача.

$$\begin{cases} K=0, \text{ якщо } (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{ед.заг}} > \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} > \sigma); \\ K=1, \text{ якщо } (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{ед.заг}} \leq \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} \leq \sigma). \end{cases} \quad (21)$$

де δ – порогове значення різниці діючої сили тяги та загального електродинамічного зусилля протидії при ввімкненні вимикача;

σ – порогове значення різниці діючої сили тяги та мінімально допустимого тягового зусилля розмикання при вимкненні вимикача;

$F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}}$ – мінімально допустиме тягове зусилля розмикання при вимкненні вимикача (визначається експериментальним шляхом);

K – логічна зміна, що характеризує виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.

Зведемо рівняння (14 ÷ 21) в одну систему рівнянь, які є математичним описом роботи розробленої системи виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача:

$$\left| \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt} = u_{\text{об.вим}} - i_{\text{об.вим}} \cdot R_{\text{об.вим}}; \\ V_{\text{вим}} = \frac{dx}{dt}; \\ F_{\text{т.вим}} = \frac{i_{\text{об.вим}}}{2 \cdot V_{\text{вим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt}; \\ \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt} = u_{\text{об.вим}} - i_{\text{об.вим}} \cdot R_{\text{об.вим}}; \\ V_{\text{вим}} = \frac{dx}{dt}; \\ F_{\text{т.вим}} = \frac{i_{\text{об.вим}}}{2 \cdot V_{\text{вим}}} \cdot \frac{d\Psi_{\text{об.вим}}}{dt}; \\ F_{\text{ед.заг}} = 10^{-7} i_A^2 \ln \frac{r_{\text{k.A}}}{r_{\text{o.A}}} + 10^{-7} i_B^2 \ln \frac{r_{\text{k.B}}}{r_{\text{o.B}}} + 10^{-7} i_C^2 \ln \frac{r_{\text{k.C}}}{r_{\text{o.C}}}; \\ K=0, \text{ якщо } (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{ед.заг}} > \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} > \sigma); \\ K=1, \text{ якщо } (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{ед.заг}} \leq \delta) \vee (F_{\text{т.вим}} - F_{\text{т.вим}}^{\text{доп}} \leq \sigma). \end{array} \right. \quad (22)$$

Отже, розроблена математична модель (22) дозволяє визначити знос контактної системи в процесі роботи вакуумного вимикача. Сигнал про зношення контактів формується як при ввімкненні так і при вимкненні вимикача. Застосування розробленої математичної моделі дозволяє вчасно попереджувати оперативний персонал про критичний стан контактної системи вимикача, необхідність виведення його в ремонт та запобігання його подальшого пошкодження.

Висновок. Вакуумні вимикачі мають ряд переваг перед іншими типами комутаційних апаратів. Найпоширенішим типом приводного механізму у вакуумних вимикачах є електромагнітна західка.

Дугові процеси під час комутації вакуумних вимикачів у контактних з'єднаннях призводять до зношення контактної системи. Для зменшення негативної дії горіння дуги на контактну систему у вакуумних дугогасильних камерах виробники створюють різні конструкції силових контактів вимикачів. Важливим є контроль електродинамічної сили відкиду при ввімкненні вакуумного вимикача. Розроблена математична модель дозволяє завчасно виявляти зношення контактної системи при комутації вакуумного вимикача. окремо розглядається процес визначення зносу силових контактів при ввімкненні і при вимкненні вимикача. При ввімкненні здійснюється порівняння тягового зусилля із загальною електродинамічною силою відкиду по усіх полюсах контактної системи. При вимкненні порівнюється діюче приводне тягове зусилля із мінімально допустимим тяговим зусиллям для процесу вимкнення.

Запропонована модель дозволяє своєчасно виявляти порушення роботи контактної системи та попереджувати відмову роботи вакуумного вимикача.

Список літератури

- Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. Москва: Наука, 1970. 536 с.
- Байдра Е.И. Мультифизическая модель расчета граничного тока сваривания контактов вакуумного выключателя. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ», 2014, № 41. С. 3 – 9.
- Перцев А.А., Белотелов В.П., Рильская Л.А. Способ испытаний вакуумных выключателей на стойкость при сквозных токах короткого замыкания. Патент RU, № 2269140, 2006.
- Деева В.С., Слободян С.М. Модель коагуляции контакта вакуумного выключателя. Вопросы электромеханика. Труды ВНИИЭМ. Москва: САМ -ПОЛІГРАФІСТ. 2013, № 4. С.39 – 42.
- Аношин О.А., Петров П.В., Малаховский С.И. О возможности использования силы удержания привода как критерия оценки основных характеристик вакуумных выключателей. Электрические сети и системы. Київ: Редакція журналу Електричні мережі та системи. 2005, № 6. С. 10 – 12.
- Wang X., Rong M., Wu Y., Yang F., Jia S. Analyses of mechanical characteristics of vacuum circuit breaker during the closing process taking electrodynamic force into account. IET Science, Measurement & Technology. 2007. Vol. 1, issue 6. pp. 323 – 328.
- Rong M., Wang X., Yang W., Jia S. Theoretical and experimental analyses of the mechanical characteristics of a medium-voltage circuit breaker. IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology. 2005. Vol. 152, issue 2. pp. 45 – 49.
- Kang J., Choi S., En D., Kim H., Jung H. Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker. Proceedings of the 6th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines. Tenerife, Spain, 2006. pp. 80 – 84.

9. Zhan X., Liu X., Li L., Zhu G., Li P. Experimental research on arc characteristics for a 40.5-kV vacuum circuit breaker. *The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*. Chengdu, China, 2018. Vol. 2019, issue 16. pp. 2777 – 2780.
10. Sooloot A., Gholami A., Niayesh K. Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker. *International Review on Modelling and Simulations*. 2011. Vol. 4, issue 2. pp. 699 – 709.
11. Александров Г.Н., Борисов Г.С., Каплан Г.С. *Теория электрических аппаратов: учебник для вузов*. Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2000. 540 с.
12. Холявский Г.Б. *Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах*. Ленинград: Энергия, 1971. 156 с.
13. Чуничин А.А. *Электрические аппараты*. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.
6. Wang X., Rong M., Wu Y., Yang F., Jia S. Analyses of mechanical characteristics of vacuum circuit breaker during the closing process taking electrodynamic force into account. *IET Science, Measurement & Technology*. 2007, vol. 1, issue 6. pp. 323 – 328.
7. Rong M., Wang X., Yang W., Jia S. Theoretical and experimental analyses of the mechanical characteristics of a medium-voltage circuit breaker. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*. 2005, vol. 152, issue 2. pp. 45 – 49.
8. Kang J., Choi S., En D., Kim H., Jung H. Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker. *Proceedings of the 6th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*. Tenerife, Spain, 2006. pp. 80 – 84.
9. Zhan X., Liu X., Li L., Zhu G., Li P. Experimental research on arc characteristics for a 40.5-kV vacuum circuit breaker. The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Chengdu, China, 2018, vol. 2019, issue 16. pp. 2777 – 2780.
10. Sooloot A., Gholami A., Niayesh K. Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker. *International Review on Modelling and Simulations*. 2011, vol. 4, issue 2. pp. 699 – 709.
11. Aleksandrov G.N., Borisov G.S., Kaplan G.S. *Teoriya elektricheskikh apparatov: uchebnik dlja vuzov* [Theory of electrical apparatus: a textbook for universities]. Sankt-Peterburg: SPbGTU, 2000. 540 p.
12. Holjayskij G.B. *Raschet elektrodinamicheskikh usilij v elektricheskikh apparatah* [Calculation of electrodynamic forces in electrical apparatus]. Leningrad: Energiya, 1971. 156 p.
13. CHunihin A.A. *Elektricheskie apparaty* [Electrical apparatus]. Москва: Energoatomizdat, 1988. 720 p.

References (transliterated)

1. Rahovskij V.I. *Fizicheskie osnovy kommutacii jelektricheskogo toka v vakuum* [Physical basics of switching electric current in vacuum]. Москва: Nauka, 1970. 536 p.
2. Bajda E.I. *Multifizicheskaja model' rascheta granichnogo toka svarivanija kontaktov vakuumnogo vykljuchatelja* [Multophysical model for calculating the boundary current for welding contacts of a vacuum switch]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014, № 41. pp. 3 – 9.
3. Percev A.A., Belotelov V.P., Ryl'skaja L.A. *Sposob ispytanij vakuumnnyh vykljuchatelej na stojkost' pri skvoznyh tokah korotkogo zamykanija* [Test method of vacuum circuit breakers for resistance under short-circuit currents]. Patent RU, № 2269140, 2006.
4. Deeva V.S., Slobodjan S.M. *Model' koaguljacii kontakta vakuumnogo vykljuchatelja* [Contact switch coagulation model]. *Voprosy jelektromehanika Trudy VNIIJeM* [Electromechanical matters. VNI-IEM studies]. Москва: SAM -POLIGRAFIST. 2013, №4. pp. 39 – 42.
5. Anoshin O.A., Petrov P.V., Malahovskij S.I. *O vozmozhnosti ispol'zovaniya sily uderzhanija privoda kak kriterija ocenki osnovnyh harakteristik vakuumnyh vykljuchatelej* [On the possibility of using the force of holding the drive as a criterion for evaluating the main characteristics of vacuum switches]. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electricity grid and system]. Kyiv: Redaktsiia zhurnala Elektrychni merezhi ta systemy. 2005, № 6. pp. 10 – 12.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Грабко Володимир Віталійович (Грабко Владислав Віталійович, Hrabko Volodymyr Vitaliyovych) – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, професор кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті; м. Вінниця, Україна; e-mail: grabko@vntu.edu.ua

Дідушок Олег Васильович (Дидушок Олег Васильевич, Didushok Oleh Vasylovych) – інженер автоматизованих систем керування виробництвом, Вінницька філія ТОВ КСК-Автоматизація; м. Вінниця, Україна; e-mail: didushokov@gmail.com

Надійшла 17.01.2020

А. П. ЧЕРНЫЙ, В. Ю. НОЖЕНКО, В. К. ТЫТЮК, О. К. ДАНИЛЕЙКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЗАРЕЗОНАНСНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ МАШИНЫ

Рассмотрены особенности пуска электропривода вибрационных машин с дебалансными вибровозбудителями, работающих в зарезонансном режиме. В настоящее время для зарезонансных вибрационных машин применяют нерегулируемые асинхронные двигатели повышенной мощности, что необходимо для гарантированного прохождения резонансной зоны во время пуска. Основной причиной возможного «застривания» роторов приводных двигателей вибрационных машин является резкое возрастание вибрационного момента в резонансной зоне. Завышенная установленная мощность приводного двигателя является необходимым условием для превышения врачающегося момента двигателя над моментом сопротивления вибрационной машины при прохождении резонансной зоны. Для снижения установленной мощности электропривода зарезонансной вибрационной машины предложено использование частотно-регулируемого электропривода со специальным законом частотного управления, обеспечивающим гарантированное преодоление резонансной зоны. Для увеличения момента приводных двигателей в процессе пуска предложено использование линейного закона частотного управления и дополнительного увеличения питающего напряжения на период прохождения резонансной зоны вибромашины. В работе исследованы законы частотного управления с увеличением напряжения питания в виде ступеньки и в виде импульса при прохождении резонансной зоны. С помощью математического моделирования проведены исследования частотного пуска асинхронных двигателей зарезонансной вибрационной площадки, которая используется для уплотнения бетонных смесей. Показано, что увеличение напряжения в виде ступеньки обеспечивает уменьшение потерь в асинхронном двигателе в процессе пуска по сравнению с увеличением напряжения в виде импульса. Проведены экспериментальные исследования частотного пуска асинхронного двигателя с формированием ступенчатого увеличения напряжения питания на лабораторной установке, которые подтвердили возможность увеличения момента и ускорения двигателя во время пуска.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, зарезонансная вибрационная машина, пусковой режим, резонансная зона, скачкообразное увеличение напряжения.

О. П. ЧОРНИЙ, В. Ю. НОЖЕНКО, В. К. ТИТЮК, О. К. ДАНИЛЕЙКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКУ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗАРЕЗОНАНСНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

Розглянуто особливості пуску електроприводу вібраційних машин з дебалансними віброзбуджувачами, які працюють в зарезонансному режимі. На даний час для зарезонансних вібраційних машин застосовують нерегульовані асинхронні двигуни завищеної потужності, що необхідно для гарантованого подолання резонансної зони під час пуску. Основною причиною можливого «застріяння» роторів приводних двигунів вібраційних машин є різке зростання вібраційного моменту в резонансній зоні. Завищена встановлена потужність приводного двигуна є необхідною умовою для перевищення обертального моменту двигуна над моментом опору вібраційної машини під час подолання резонансної зони. Для зниження встановленої потужності електроприводу зарезонансної вібраційної машини запропоновано використання частотно-регульованого електроприводу зі спеціальним законом частотного керування, що забезпечує гарантоване подолання резонансної зони. Для збільшення моменту приводних двигунів в процесі пуску запропоновано використання лінійного закону частотного керування і додаткового збільшення напруги живлення на період проходження резонансної зони вібромашини. У роботі дослідженні закони частотного керування зі збільшенням напруги живлення у вигляді ступінчастої і у вигляді імпульсу під час подолання резонансної зони. За допомогою математичного моделювання проведено дослідження частотного пуску асинхронних двигунів зарезонансної вібраційної площинки, яка використовується для ущільнення бетонних сумішей. Показано, що збільшення напруги у вигляді ступінчастої забезпечує зменшення втрат у асинхронному двигуні у процесі пуску порівняно зі збільшенням напруги у вигляді імпульсу. Проведено експериментальні дослідження частотного пуску асинхронного двигуна з формуванням ступеневого збільшення напруги живлення на лабораторній установці, які підтвердили можливість збільшення моменту і прискорення двигуна під час пуску.

Ключові слова: асинхронний двигун, частотно-регульований електропривод, зарезонансна вібраційна машина, пусковий режим, резонансна зона, стрибкопобідне збільшення напруги.

O. P. CHORNYI, V. YU. NOZHENKO, V. K. TYTIUK, O. K. DANILEYKO

STUDY OF STARTING A FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE OF ABOVE RESONANCE VIBRATION MACHINE

The features of starting the electric drive of vibrating machines with unbalanced vibration exciters operating in the resonant mode are considered. Currently, over-resonant vibration machines use unregulated asynchronous motors of high power, which is necessary for guaranteed passage of the resonance zone during start-up. The main reason for the possible “jamming” of the rotors of the drive motors of vibrating machines is a sharp increase in the vibration moment in the resonance zone. Overstated installed power of the drive motor is a necessary condition for exceeding the turning moment of the engine over the moment of resistance of the vibrating machine when passing through the resonance zone. To reduce the installed power of the electric drive of a resonance vibrating machine, it is proposed to use a frequency-controlled electric drive with a special law of frequency control, which ensures guaranteed overcoming of the resonance zone. To increase the torque of the drive motors during start-up, the use of the linear law of frequency control and an additional increase in the supply voltage for the period of passage of the resonance zone of the vibrator are proposed. In the work, the laws of frequency control are studied with increasing supply voltage in the form of a step and in the form of an impulse when passing through the resonance zone. Using mathematical modeling, studies were conducted of the frequency start of asynchronous motors of the off-resonant vibration platform, which is used to compact concrete mixtures. It is shown that an increase in voltage in the form of a step provides a decrease in losses in an induction motor and during start-up as compared to an increase in voltage in the form of a pulse. Experimental studies of the frequency start of an induction motor with the formation of a stepwise increase in the supply voltage.

Keywords: induction motor, frequency-controlled electric drive, above resonance vibration machine, starting mode, resonance zone, voltage jump.

Введение. В настоящее время вибрационные машины (ВМ) и технологии нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и народного хозяйствования. В частности, для уплотнения бетонных смесей, транспортирования насыпного груза, дробления железобетонных плит и ферросплавов, а также для выполнения других технологических операций наиболее распространение получили ВМ с дебалансными вибровозбудителями, работающие в зарезонансном режиме [1–3]. Указанный вид ВМ характеризуется относительной простотой оборудования, достаточно стабильной его работой при изменении нагрузки в технологическом режиме. Однако, в процессе пуска ВМ при прохождении резонансной зоны возникают интенсивные колебания рабочего органа ВМ, которые сопровождаются существенными динамическими нагрузками на конструкционные элементы и опоры ВМ, роторы приводных двигателей и приводят к поломкам упругих элементов, быстрому выходу из стоя оборудования. С целью снижения проявления указанных недостатков при преодолении резонансной зоны к ВМ применяют нерегулируемый электропривод (ЭП) с повышенной в 2–5 раз мощностью приводных двигателей, которые в установившемся режиме работают с существенной недогрузкой. Это, в свою очередь, приводит к нерациональному использованию электрической энергии, а также ограничению возможностей управления ВМ при выполнении технологических операций [1–3]. Таким образом, на данный момент решение проблемы преодоления резонансной зоны в процессе пуска является своевременной и важной задачей.

Анализ состояния вопроса. Решением проблемы пуска зарезонансных ВМ занимались многие учёные, что привело к формированию способов уменьшения резонансных колебаний ВМ, к которым относятся [1, 2, 4–6]: использование форсированного пуска с помощью конденсаторов, последовательно включаемых с обмотками статора двигателя, применение раздельного (поочередного) пуска двигателей ВМ применение управляемых динамических гасителей колебаний, использование вибровозбудителей с автоматическим или вручную регулируемым статическим моментом дебалансов и др. Однако вышеперечисленные способы имеют ряд недостатков и не нашли широкого применения на практике. Кроме того, данные способы не решают проблему использования приводных двигателей к зарезонансным ВМ независимой мощности.

Решение проблемы пуска ВМ с помощью использования систем регулируемого ЭП некоторые учёные считают экономически нецелесообразной, если применять её только для преодоления резонансной зоны. Но основной задачей использования регулируемого ЭП к зарезонансным ВМ должно быть не только преодоление резонанса без «застревания», а и обеспечение увеличения величины момента двигателя над вибромоментом во время прохождения резонансной зоны при использовании двигателей мощностью, необходимой для работы в установившемся технологическом режиме.

Это позволит повысить КПД и коэффициент мощности двигателей, снизить потребление электрической энергии, изменять параметры колебаний во время выполнения технологического процесса, увеличить срок службы оборудования.

Цель работы. Исследование и анализ преодоления резонансной зоны в процессе пуска зарезонансной вибрационной машины при использовании частотно-регулируемого электропривода.

Формирования управляемых воздействий частотного пуска вибрационной машины.

В [7] указано, что при использовании частотно-регулируемого ЭП к зарезонансным ВМ целесообразно применять линейный закон частотного управления с постоянным отношением напряжения к частоте

$$\frac{U}{f} = \text{const},$$

поскольку этот закон обеспечивает приемлемые токовые и механические нагрузки, по сравнению с другими законами. К тому же, на основании исследований, приведенных в [7, 8] для гарантированного преодоления резонансной зоны необходимо увеличение момента асинхронных двигателей (АД) во время преодоления резонансной зоны, которое целесообразно выполнять скачкообразным увеличением напряжения питания.

Самая простая реализация скачкообразного увеличения напряжения питания во время подхода к резонансной зоне может быть выполнена в двух вариантах: если напряжение имеет ступенчатый вид; если напряжение имеет вид импульса.

Для формирования дополнительных управляемых пусковых воздействий необходимо знать параметры ВМ и приводных двигателей: резонансную частоту, максимум вибрационного момента, параметры АД, его перегрузочную способность по току и моменту. Следует отметить, что сравнивая частоту питания АД с заданной резонансной частотой ВМ, можно сделать вывод, что значение частоты питания АД, равное резонансной частоте ВМ, наступает раньше, чем происходит резонанс в механической части ВМ. Поэтому скачкообразное увеличение напряжения можно осуществлять в момент равенства частоты питания АД и заданной резонансной частоты ВМ.

Первый вариант – напряжение питания имеет ступенчатый вид.

В этом случае формирование напряжения и частоты питания АД ВМ в процессе пуска и во время преодоления резонансной зоны иллюстрируется рисунком 1 [7].

В начальный момент времени пуск вибrosистемы осуществляется с законом частотного управления $U/f = \omega_1$ (участок ab , рис. 1). При этом время развертки частоты должно быть рассчитано, как предложено в [8, 9], поскольку для разных типов двигателей и разной нагрузки эта величина может изменяться. Если частота питания АД будет равняться резонансной частоте ВМ ($2\pi f_d = \omega_r$), то будет осуществляться увеличение напряжения на величину ΔU (рис. 1).

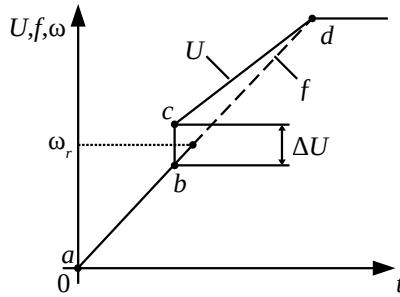


Рис. 1. Принцип формирования напряжения и частоты питания АД в процессе пуска во время преодоления резонансной зоны в ступенчатом виде

В этом случае отношение напряжения к частоте при прохождении резонансной зоны отличается от $\frac{U}{f} = \gamma_1$ и равняется $\frac{U + \Delta U}{f} = \gamma_2$ (участок bc , рис. 1).

Величину ΔU следует выбирать такой, чтобы выполнялось условие $I_1 = k_i \cdot I_{n1}$, где I_1 – текущее значение тока статора; k_i – перегрузочная способность АД по току; I_{n1} – номинальный ток статора АД.

После преодоления резонансной зоны (участок cd , рис. 1) напряжение и частота изменяются с отношением $U / f = v_3$. В точке d АД выходит в установившийся режим.

Закон изменения напряжения во времени при пуске в этом варианте имеет вид [7]:

$$U_z = \begin{cases} \frac{U_n}{t_{r.m}} t, & \text{если } t \leq t_{on}; \\ \frac{U_n - \Delta U}{t_{r.m}} t + \Delta U, & \text{если } t_{r.m} > t > t_{on}; \\ U_n, & \text{если } t \geq t_{r.m}, \end{cases} \quad (1)$$

где U_n – номинальное значение напряжения питания; $t_{r.m}$ – время разворотки частоты; t – текущее значение времени; t_{on} – время, когда происходит скачкообразное увеличение напряжения;

ΔU – значение напряжения, на которое происходит его скачкообразное увеличение.

Второй вариант – напряжение питания имеет вид импульса.

В этом случае формирование напряжения и частоты питания АД ВМ в процессе пуска и во время преодоления резонансной зоны иллюстрируется рисунком 2.

Формирования напряжения питания в этом варианте на участке $a'b'c'$ (рис. 2) выполняется идентично, как и в первом варианте на участке abc (рис. 1).

После скачкообразного увеличения напряжения питания на величину ΔU осуществляется его дальнейший рост (участок $c'd'$, рис. 2). На этом участке рост U происходит параллельно f с отношением $U / f = v_3$.

Одной из основных задач при формировании напряжения питания в виде импульса является определение момента отключения скачкообразного увеличения напряжения в процессе пуска.

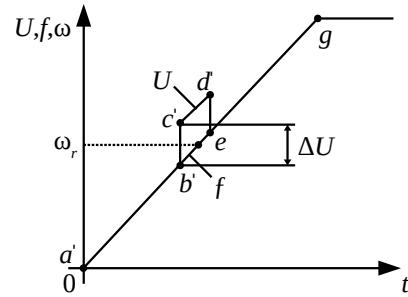


Рис. 2. Принцип формирования напряжения и частоты питания АД в процессе пуска во время преодоления резонансной зоны в виде импульса

Для этого необходимо, чтобы ВМ была оснащена датчиками тока и напряжения для измерения мощности. В схеме АД с ПЧ мощность может быть определена произведением напряжения на инверторе на ток в цепи постоянного тока:

$$P_d = U_i \cdot I_i, \quad (2)$$

где U_i , I_i – текущее значение напряжения и тока на инверторе.

Затем определяется знак производной dP_d/dt , при $\frac{dP_d}{dt} = 0$ или $\frac{dP_d}{dt} < 0$ отключается скачкообразное увеличение напряжения, что указывает на преодоление резонансной зоны.

На рис. 2 отключения форсированного увеличения напряжения, то есть уменьшение его на величину ΔU , происходит на участке $d'e$. Соответственно, дальше после преодоления резонансной зоны на участке eg (рис. 2) отношение напряжения к частоте снова равно $U / f = v_1$, как и в начале пуска (участок $a'b'$, рис. 2). В точке g АД выходят в устоявшийся режим.

Закон изменения напряжения во времени при пуске при таком варианте имеет вид:

$$U_z = U + \Delta U, \quad (3)$$

$$\text{где } U_z = \begin{cases} \frac{U_n}{t_{r.m}} t, & \text{если } t_{on} > t > 0; \\ \frac{U_n + \Delta U}{t_{r.m}} t, & \text{если } t_{off} > t \geq t_{on}; \\ \frac{U_n}{t_{r.m}} t, & \text{если } t_{r.m} > t \geq t_{off}; \\ U_n, & \text{если } t \geq t_{r.m}. \end{cases}$$

t_{off} – время, когда происходит отключение скачкообразного увеличения напряжения.

Результаты математического моделирования формирования управляемых воздействий частотного пуска вибрационной машины. Для подтверждения теоретических положений по формированию напряжения питания в процессе частотного пуска АД ВМ, а именно во время преодоления резонансной зоны, было проведено математическое моделирование пусковых режимов АД во время линейного изменения напряжения питания с $t_{r.m}$ и скачкообразного увеличения.

В качестве зарезонансной ВМ при математическом моделировании рассматривалась вибрационная площадка блочной конструкции с двухвальными дебалансными вибровозбудителями [1, 3], которая используется для уплотнения бетонных смесей в форме. Математическое описание вибрационной площадки выполнялся в соответствии с [10] с конструкционными параметрами: полная приведена масса колеблющихся частей ВМ с формой и бетонной смесью $m_{pl} = 11000$ кг; коэффициент жесткости опор ВМ $c_0 = 1,268 \cdot 10^8$ Н/м; коэффициент демпфирования $b_0 = 30600$ Нс/м; расстояние дебаланса от оси вращения $r = 0,1$ м; масса дебаланса $m_0 = 22$ кг. Математическая модель АД была построена в трехфазной системе координат [11, 12].

Для такой вибрационной площадки применяются два нерегулируемые АД серии 4A180M4 мощностью 30 кВт каждый. При использовании частотно-регулируемого ЭП приводные АД были заменены на АД мощностью, необходимой для работы вибрационной площадки в установившемся технологическом режиме, а именно на АД серии 4A132M4 со следующими паспортными данными [11]: $P_n = 11$ кВт; $n_0 = 1500$ об/мин; $\lambda_p = 2,2$; $\lambda_k = 3,0$; $s_n = 2,8\%$; $s_k = 19,5\%$; $k_i = 7,5$; $\eta = 87,5\%$; $J_d = 0,04$ кг·м².

Исследование частотного пуска проводились для трёх случаев: при линейном законе частотного управления с временем развёртки частоты 1,2683 с и при скачкообразном увеличении напряжения питания согласно рис. 3.

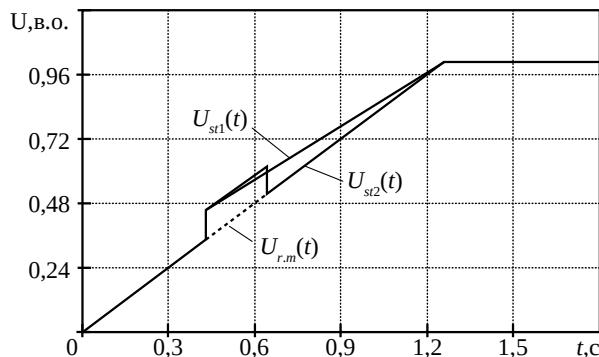


Рис. 3. Кривые напряжения питания асинхронного двигателя во время его увеличения в ступенчатом виде и в виде импульса

На рис. 3 обозначены кривые напряжения: $U_{r.m}(t)$ – при линейном увеличении напряжения с $t_{r.m}$; $U_{st1}(t)$ – при увеличении напряжения в ступенчатом виде; $U_{st2}(t)$ – при увеличении напряжения в виде импульса.

Увеличение напряжения в ступенчатом виде и в виде импульса выполнялось, когда значение частоты питания АД равнялось резонансной частоте, а именно 53,68 с⁻¹, на 11 %.

Формирования задания частотного пуска идентичное для обоих АД ВМ, поэтому исследование пусковых режимов ЭП ВМ проводилось на одном из двух АД мощностью 11 кВт.

Результаты математического моделирования частотного пуска ЭП вибрационной площадки приведены на рис. 4, 5, где индексы обозначений кривых угловой скорости АД и момента соответствуют индексам обозначений кривых формирования напряжения питания (рис. 3).

Анализ кривых момента АД, приведенных на рис. 4, показал, что подача скачком напряжения питания в процессе пуска позволяет увеличить момент двигателя на 77 Нм и 81 Нм при преодолении резонансной зоны по сравнению со случаем, когда частотный пуск осуществляется по линейному закону с $t_{r.m}$.

Из кривых угловой скорости вращения АД $\omega_{st1}(t)$, $\omega_{st2}(t)$, видно (рис. 5), что при формировании напряжения, согласно кривым $U_{st1}(t)$, $U_{st2}(t)$ (рис. 3), увеличение момента двигателя позволяет полностью избежать «застревания» роторов приводных АД и уменьшить время запуска АД примерно на 0,1 с, по сравнению с $\omega_{r.m}(t)$.

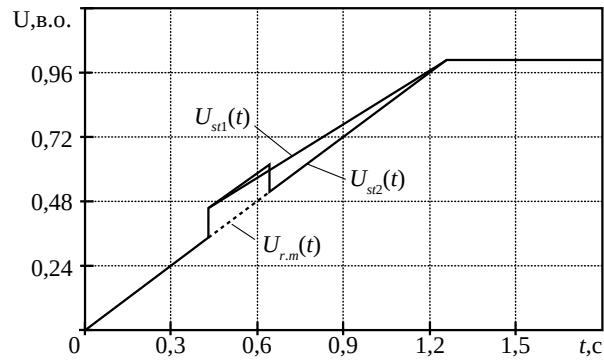


Рис. 4. Кривые момента АД ВМ при увеличении напряжения питания в ступенчатом виде и в виде импульса

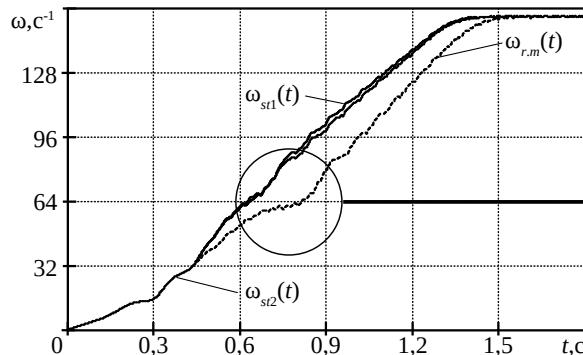
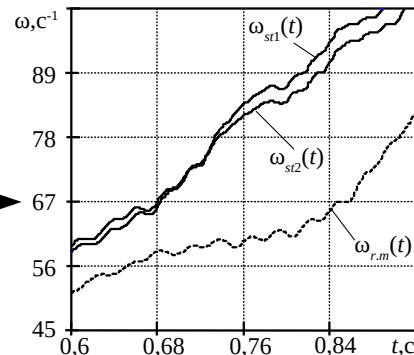


Рис. 5. Кривые угловой скорости вращения АД ВМ при увеличении напряжения питания в ступенчатом виде и в виде импульса



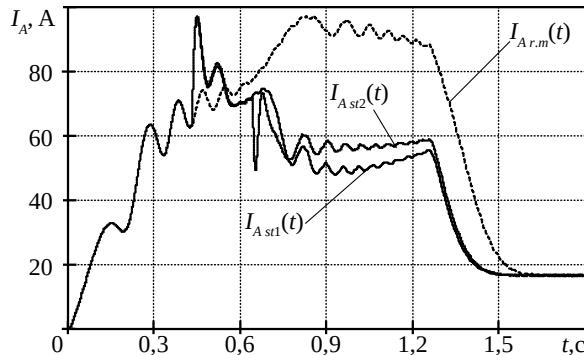


Рис.6. Кривые тока статора фазы А АД ВМ при увеличении напряжения в ступенчатом виде и в виде импульса

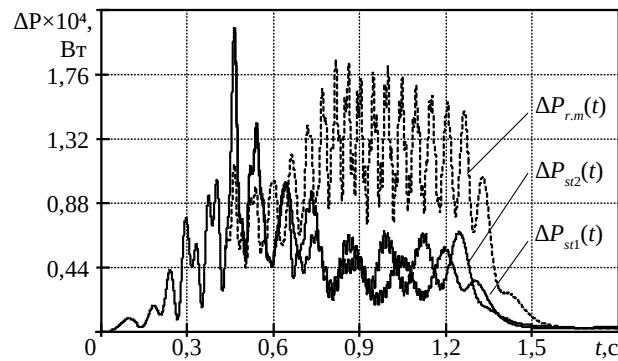


Рис. 7. Кривые потерь в АД при увеличении напряжения в ступенчатом виде и в виде импульса

Для определения наиболее целесообразного увеличения напряжения питания во время преодоления резонансной зоны в процессе пуска АД построены кривые тока статора фазы А АД (рис. 6) и кривые потерь в АД (рис. 7) в соответствии с выражением:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} = \int_0^{t_p} (3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2) dt, \quad (4)$$

где $\Delta P_{m1}, \Delta P_{m2}$ – потери в меди в статоре и роторе АД; t_p – время пуска АД.

В табл. 1 для сравнения приведены значения потерь в статоре АД ВМ, роторе и суммарных потерь при частотном пуске в случае формирования напряжения питания согласно рис. 3. Из таблицы видно, что в случае изменения напряжения питания в согласовании с кривой $U_{st}(t)$ (рис. 3) значение суммарных потерь минимальное по сравнению с другими случаями.

Таким образом, анализ проведённых исследований подтверждает, что наиболее целесообразно увеличивать напряжение питания в процессе частотного пуска АД ВМ в ступенчатом виде согласно кривой

Таблица 1 – Значение потерь в АД при частотном пуске при разных вариантах формирования напряжения питания

Формирование напряжения питания	Потери в статоре АД, кВт	Потери в роторе АД, кВт	Суммарные потери в АД, кВт
$U_{r.m.}(t)$	7,355	4,46	11,815
$U_{st1}(t)$	3,968	2,487	6,455
$U_{st2}(t)$	4,175	2,563	6,738

$U_{st1}(t)$ (рис. 3), поскольку такое увеличение проще в реализации и обеспечивает меньшее значение потерь в АД по сравнению с другими случаями.

Экспериментальные исследования. Проверка полученных результатов формирования частотного пуска с помощью математического моделирования была проведена на экспериментальной лабораторной установке, состоящей из АД с короткозамкнутым ротором серии АИРМ63А2У2 ($P_n = 0,37$ кВт; $n_0 = 3000$ об/мин), преобразователя частоты фирмы ABB, шунтов токовых внутренних для измерения тока, цифровой системы регистрации и визуализации электрических сигналов «Визир-3» [7].

Формирования задания частотного пуска АД выполнялось в соответствии с кривыми, приведенными на рис. 1. При настройке параметров преобразователя частоты время развёртки частоты задавался 5 с, на 1,8 с выполнялось ступенчатое увеличение напряжения питания на 11 %.

При проведении экспериментальных исследований пуска фиксировались параметры тока фаз статора АД с помощью шунтов, которые включены в цепи питания «преобразователь частоты-асинхронный двигатель». Регистрация и визуализация измеренных сигналов тока статора асинхронного двигателя выполнялась с помощью регистратора электрических сигналов «Визир-3», который позволяет записать измеренные сигналы в текстовый файл. Для дальнейшего анализа полученных результатов исследований текстовые файлы измеренных сигналов отображаются с помощью программных продуктов для математических и инженерных расчётов на персональном компьютере.

Численный анализ полученных сигналов напряжения питания и тока статора фазы А АД почти невозможен, потому что они засорены высокочастотными помехами, которые возникают из-за формирования преобразователем ШИМ-напряжения с частотой модуляции 8 кГц. Для расчёта момента АД была проведена фильтрация сигналов напряжения и тока с помощью скользящего среднего с шириной окна 7.

На рис. 8, 9 приведены сигналы напряжения питания и тока статора фазы А АД после фильтрации. Форма напряжения питания и тока статора фазы А АД на периоде после фильтрации выглядит, как показано на рис. 10, 11.

Для воспроизведения электромагнитного момента по измеренным сигналам тока и напряжения использовалось уравнение электрического равновесия:

$$\frac{d\psi}{dt} = U - IR. \quad (5)$$

где U – напряжение; I – ток; R – сопротивление.

С помощью численного интегрирования потокосцепления было определено потокосцепления фазы, используя формулу Эйлера:

$$\psi_{j+1} = \psi_j + h(U_j - I_j R), \quad (6)$$

где $h = 0,00005$ – шаг интегрирования, равный времени дискретизации при измерении сигналов тока и напряжения питания.

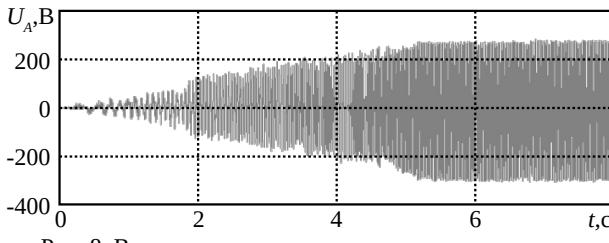


Рис. 8. Временная зависимость напряжения питания фазы А асинхронного двигателя

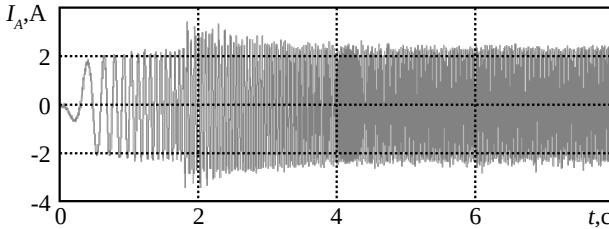


Рис. 9. Временная зависимость тока статора фазы А асинхронного двигателя

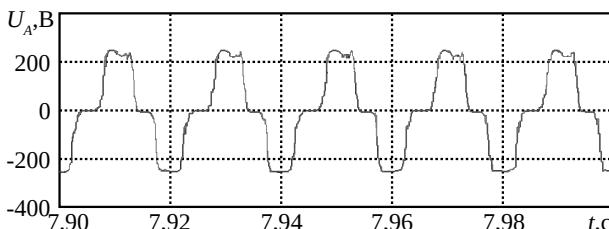


Рис. 10. Временная зависимость напряжения питания фазы А асинхронного двигателя на периоде

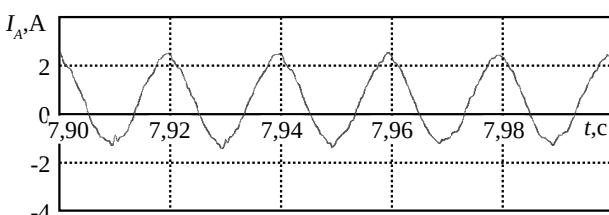


Рис. 11. Временная зависимость тока статора фазы А асинхронного двигателя на периоде

Такая процедура выполнялась для всех фаз двигателя. Электромагнитный момент определялся согласно выражения:

$$M_{em} = 2 \frac{\sqrt{3}}{3} [(\Psi_A - \Psi_B) i_C + (\Psi_B - \Psi_C) i_A + (\Psi_C - \Psi_A) i_B], \quad (7)$$

где Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C – полные потокосцепления трёх фаз статора А, В, С;

i_A, i_B, i_C – токи трёх фаз статора А, В, С.

Используя уравнения движения

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_s \quad (8)$$

где M_s – момент сопротивления, и численно интегрируя его с применением формулы Эйлера, определена угловая скорость вращения ротора АД.

Полученные временные зависимости момента и угловой скорости вращения АД показаны на рис. 12 серым цветом.

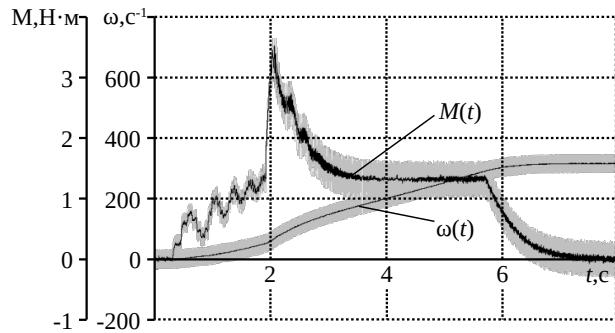


Рис. 12. Временные зависимости момента и угловой скорости вращения АД

Из-за зашумленности интегрирующих сигналов момента и угловой скорости вращения АД имеют вид, который сложно анализировать. Поэтому было выполнено частичное удаление шума, используя скользящее среднее. Полученные зависимости показаны чёрной сплошной линией (рис. 12).

Полученные результаты экспериментальных исследований показали, что сформированный скачок напряжения питания позволяет увеличить момент и ускорение АД во время пуска и подтверждает адекватность теоретических результатов.

Выводы. Для прохождения резонансной зоны в процессе пуска вибрационной машины предложено увеличение момента приводных двигателей за счёт скачкообразного изменения напряжения питания.

Проведены исследования частотного пуска зарезонансной вибрационной машины при замене приводных двигателей мощностью в три раза меньшей исходной для двух вариантов скачкообразного увеличение напряжения питания, когда напряжение имеет ступенчатый вид и вид импульса. Анализ полученных результатов показал, что наиболее целесообразным является увеличение напряжения питания в ступенчатом виде, поскольку в таком случае значение суммарных потерь в АД меньше по сравнению со вторым вариантом. Ступенчатое увеличение напряжения питания АД в процессе пуска обеспечивает превышение динамического момента АД над вибрационным моментом в резонансной зоне и позволяет полностью устраниТЬ «застрение» роторов приводных двигателей зарезонансной ВМ, уменьшить время пуска.

С помощью лабораторной установки проведены экспериментальные исследования формирования увеличения напряжения питания в ступенчатом виде при частотном пуске АД, которые подтвердили возможность увеличения момента двигателя в процессе пуска и применения частотно-регулируемого электропривода к зарезонансным вибрационным машинам для преодоления резонансной зоны без «застривания».

Список литературы

1. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т 4: Вибрационные машины и процессы / Под ред. Э.Э. Лавендела. Москва: Машиностроение, 1981. 509 с.
2. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. Москва: Наука, 1971. 896 с.
3. Сергеев В.П. Строительные машины и оборудование: учебник для вузов. Москва: Высшая школа, 1987. 376 с.

4. Дмитриев В.Н., Гаврилов Е.Н. Переходные процессы зарезонансных вибрационных машин. *Электротехнические комплексы и системы управления*. Воронеж: ЗАО «Воронежский инновационно-технологический центр». 2011, №4. С.52 – 55.
5. Ярошевич Н.П., Забродець И.П., Силивонюк А.В., Ярошевич Т.С. Динамика пуска вибрационных машин с дебалансным приводом. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця: Вінницький національний аграрний університет. 2015, Вип. 4 (80). С. 113 – 120.
6. Блехман И.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Ярошевич Н.П. Способ пуска вибрационной машины с двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями. Патент RU, № 2516262, 2012.
7. Nozhenko V., Rodkin D., Bohatyrov K. Control of passing the resonance zone during start-up of above resonance vibration machines. *Proceedings of the International conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 23-25 September, 2019. pp. 146 – 149.
8. Ноженко В.Ю., Чорний О.П., Родькін Д.Й., Ченчевої В.В. Керування пуском зарезонансної вібраційної машини з дебалансними віброзбуджувачами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017, Вип. 27 (1249). С. 384 – 387.
9. Сандрлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. URL: <http://www.toroid.ru/sandlerAS2.html>. (дата обращения 15.01.2020).
10. Ноженко В.Ю., Родькін Д.Й., Ченчевої В.В. Особенности пуска зарезонансных дебалансных машин с дебалансными вибровозбудителями. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2015, Вип. 12 (1121). С. 218 – 223.
11. Копылов И.П. *Математическое моделирование электрических машин*. Москва: Высшая школа, 2001. 372 с.
12. Чорний О.П., Толочко О.І., Титюк В.К., Родькін Д.Й., Чекавський Г.С. *Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія*. Кременчук: ПП Щербатих О.В, 2016. 299 с.

References (transliterated)

1. *Vibracii v tekhnike: spravochnik* [Vibration in technology: a handbook]. V 6 t. T 4: *Vibracionnye mashiny i processy* [Vibration machines and processes] / red. E.E. Lavendela. Moskva: Mashinostroenie, 1981. 509 p.
2. Blekman I.I. *Sinkhronizatsiya dinamicheskikh sistem* [Synchronization of dynamical systems]. Moskva: Nauka, 1971. 896 p.
3. Sergeyev V.P. *Stroitel'nye mashiny i oborudovanie: uchebnik dlya vuzov* [Construction machinery and equipment: university textbook]. Moskva: Vysshaya shkola, 1987. 376 p.
4. Dmitriev V.N., Gavrilov, E.N. *Perekhodnye protsessy zarezonansnykh vibracionnykh mashin* [Transient processes of the above resonance vibrating machines]. *Elektroteknicheskiye kompleksy i sistemy upravleniya* [Electrical complexes and control systems]. Voronezh: ZAO «Voronezhskij innovacionno-tehnologicheskij centr». 2011, №4. pp. 52–55.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чорний Олексій Петрович (Черный Алексей Петрович, Chornyi Oleksii Petrovych) – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, директор інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління; м. Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8270-3284>; e-mail: ochornyi@ukr.net

Ноженко Вікторія Юріївна (Ноженко Виктория Юрьевна, Nozhenko Viktoriia Yuriivna) – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, асистент кафедри систем енергоспоживання та енергетичного менеджменту; м. Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8270-3284>; e-mail: ochornyi@ukr.net

Титюк Валерій Константинович (Тытиук Валерий Константинович, Tytiuk Valerii Kostiantynovych) – кандидат технічних наук, доцент, Криворізький національний університет, доцент кафедри електромеханіки; м. Кривий Ріг, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1077-3288>; e-mail: dinalt2006@gmail.com

Данилейко Олег Костянтинович (Данилейко Олег Константинович, Danileiko Oleg Kostiantynovych) – Криворізький національний університет, старший викладач кафедри електромеханіки; м. Кривий Ріг, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7613-8271>; e-mail: adanil49g@gmail.com

5. YAroshevich N.P., Zabrodec' I.P., Silivonyuk A.V., YAroshevich T.S. *Dinamika puska vibracionnyh mashin s debalansnym privodom* [Dynamics start vibrating machines with unbalanced drive]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiakh* [Vibrations in engineering and technology]. Vinnytsia: Vinnytskyi natsionalnyi ahrarnyi universytet. 2015, Vyp. 4(80). pp. 113 – 120.
6. Blekman I.I., Vajsberg L.A., Vasil'kov V.B., YAroshevich N.P. *Sposob puska vibracionnoy mashiny s dvumya samosinkhroniziruyushchimisya debalansnymi vibrovozbuditelyami* [The method of starting a vibration machine with two self-synchronizing unbalanced vibration excitors]. Patent RU, № 2516262, 2012.
7. Nozhenko V., Rodkin D., Bohatyrov K. Control of passing the resonance zone during start-up of above resonance vibration machines. *Proceedings of the International conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 23-25 September, 2019. pp. 146 – 149.
8. Nozhenko V.Yu., Chornyi O.P., Rodkin D.Y., Chenchevoy V.V. Keruvannya puskom zarezonansnoi vibratsiyoyi mashyny z debalansnymi vibrovozbudzuvachamy [Controlling the start of a resonant vibration machine with unbalance exciters]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of National Technical University «KhPI】. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, Vyp. 27 (1249). pp. 384 – 387.
9. Sandler A.S., Sarbatov R.S. *Avtomatischeskoye chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigateleyami* [Automatic frequency control of induction motors]. URL: <http://www.toroid.ru/sandlerAS2.html>. (accessed 15.01.2020).
10. Nozhenko V., Rodkin D., Chenchevoy V. Osobennosti puska zarezonansnykh debalansnykh mashin s debalansnymi vibrovozbuditelyami [Features superresonance start vibrating machines with unbalanced vibration excitors]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of National Technical University «KhPI】. Kharkiv: NTU «KhPI», 2015, Vyp. 12(1121). pp. 218 – 223.
11. Kopylov I.P. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moskva: Vysshaya shkola, 2001. 372 p.
12. Chornyi O.P., Tolochko O.I., Tytiuk V.K., Rodkin D.I., Chekavskyi H.S. *Matematichni modeli ta osoblyvosti chyselnykh rozrakhunkiv dynamiky elektropryvodiv z asynchronnymi dyhyunamy: monohrafia* [Mathematical models and features of numerical calculations of the dynamics of drives with induction motors: monograph]. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V. Publ., 2016. 299 p.

Поступила 29.01.2020

Б. М. ЧУНАШВИЛИ, А. М. ПЕТРОСЯН, Т. Г. ГАМРЕКЕЛАШВИЛИ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК, СОЗДАВАЕМЫХ ТРЕХФАЗНЫМИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМИ ПЕЧАМИ

Разработана система управления устройства ограничения гармоник высшего порядка (ГВП) напряжения, создаваемых электродуговыми печами (ЭДП). Для ограничения (подавления) ГВП в каждой фазе предусмотрено устройство, представляющее собой три комплекта фильтров, настроенных на определённую частоту режима работы ЭДП (короткое замыкание - горение дуги - пауза). Управление устройствами каждой фазы происходит посредством контроля величин проходящего в электроде тока и напряжения дугового промежутка. В процессе работы печи система управления подключает к сети необходимый на тот момент комплект фильтров устройства ограничения ГВП.

Ключевые слова: система управления, устройства ограничения, гармоники высшего порядка, трёхфазная сталеплавильная электродуговая печь.

Б. М. ЧУНАШВИЛИ, А. М. ПЕТРОСЯН, Т. Г. ГАМРЕКЕЛАШВИЛИ

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ ОБМЕЖЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНИК, ЩО СТВОРЕНІ ТРИФАЗНИМИ ЕЛЕКТРОДУГОВИМИ ПЕЧАМИ

Розроблено систему управління пристрою обмеження гармонік вищого порядку (ГВП) напруги, створюваних електродуговими печами (ЕДП). Для обмеження (придушення) ГВП в кожній фазі передбачено пристрій, що представляє собою три комплекти фільтрів, налаштованих на певну частоту режиму роботи ЕДП (коротке замикання-горіння дуги-пауза). Управління пристроями кожної фаза відбувається по засобом контролю величин проходить в електроді струму і напруги дугового проміжку. В процесі роботи печі система управління підключає до мережі необхідний на той момент комплект фільтрів пристрой обмеження ГВП.

Ключові слова: система управління, пристрой обмеження, гармоніки вищого порядку, трифазна сталеплавильна електродугова піч.

B. M. TCHUNASHVILI, A. M. PETROSYAN, T. G. GAMREKELASHVILI

DEVICE CONTROL SYSTEM FOR HIGH HARMONICS CREATED BY THREE-PHASE ELECTRIC ARC FURNACES

A control system has been developed for a device for limiting harmonics of higher order (GWP) voltage created by electric arc furnaces (EAF). To limit (suppress) the HWP in each phase, a device is provided that consists of three sets of filters tuned to a specific frequency of the EAF operation mode (short circuit-arc-pause burning). The devices of each phase are controlled by means of monitoring the values of the current passing in the electrode and the voltage of the arc gap. During the operation of the furnace, the control system connects to the network the set of filters of the hot water supply limit device necessary at that time.

Keywords: control system, limiting devices, higher-order harmonics, three-phase steelmaking electric arc furnace.

Введение. В настоящее время постоянно растут число и мощность современных электротехнологических установок и комплексов (ЭТУК), характеризуемых сложными и тяжёлыми режимами работы, создающими в сети электроснабжения (ЭС) незатухаемые электромагнитные динамические процессы (ЭДП) [1]. Из общего числа ЭТУК особенно тяжёлым режимам работы отличаются трёхфазные сталеплавильные электродуговые печи (СЭДП), которые являются главным источником кондуктивных электромагнитных по мех (ЭМП) большой мощности в элементах сети электроснабжения. СЭДП изготавляются установленной мощностью до 140 МВт и они работают в эксплуатационном режиме короткого замыкания [2]. Следовательно, ток нагрузки СЭДП в нормальном режиме работы характеризуется значительным изменением формы кривой и резкими толчками, создаваемых ЭМП в сети ЭС. При этом, в общем числе ЭМП в основном доминируют провал, асимметрия и искажение синусоидальности кривой напряжения [3]. Эти ЭМП значительно ухудшают энергетические показатели и энергоэффективность как ЭТУК, так и сети электроснабжения в общем [4]. В связи с этим, ограничение ЭМП создаваемых СЭДП является гарантией энергоэффективности СЭДП и сети электроснабжения.

Постановка задачи. Вертикальное перемещение каждого из электродов СЭДП осуществляется независимыми друг от друга механизмами, которые оснащены реверсивными электроприводами постоянного тока с независимым возбуждением с подчинённой системой управления тиристорный преобразователь-двигатель. Автоматическое управление электроприводом механизма передвижения электрода (ЭПМПЭ) основа но, при этом, на изменении величины тока и напряжения между расплавленным металлом и электродом – промежутком горения дуги.

Система управления ЭПМПЭ, при подключении СЭДП к сети, одновременно приводит в движения эле ктроды каждой из фаз. Поскольку ток, протекающий через электроды, равен нулю, а напряжение дугового промежутка максимально, ЭПМПЭ перемещает электрод вертикально вниз. Смещение каждого электрода будет продолжаться до тех пор, пока электрод не коснётся шихты. При контакте электрода с шихтой происходит короткое замыкание, в результате которого напряжение дугового промежутка уменьшиться до свое го минимального значения (практически до нуля), а через электрод пройдёт ток короткого замыкания. После этого, ЭПМПЭ меняет направление перемещения электрода на противоположное (вверх), которое про-

© Б. М. Чунашвили, А. М. Петросян, Т. Г. Гамрекелашвили, 2020

должается до тех пор, пока между электродом и шихтой не образуется дуга, а значения её тока и напряжения дугового промежутка не станут равными установленным значениям. По мере протекания процесса плавления в печи дуговой промежуток (длина дуги) увеличивается, а её параметры меняются. Соответственно, для поддержания длины дуги, электропривод будет перемещать электрод вниз, а значит в процессе плавления электроды находятся в постоянном движении. Следовательно, во многих случаях изменение дугового промежутка имеет резкий характер, что приводит к гашению дуги, так как электропривод не в состоянии обеспечить нужный дуговой промежуток. По скольку режимы рабочего цикла каждой фазы СЭДП «Короткое замыкание – Устойчивое горение дуги – Гашение дуги» (КЗ-ГД-П) различны по длительности, в электродах СЭДП протекают три различных по величине и форме кривой тока нагрузки. В связи с тем, что процесс плавления металла под каждым из электродов протекает неоднородно, технологический цикл КЗ-ГД-П разных электродов протекает по-разному. В результате этого, в элементах сети электроснабжения в больших объемах протекают резко изменяющиеся асимметричные токи. Кривые изменяющегося действующего значения тока, протекающего через электроды электродуговой печи, представлены на рис. 1.

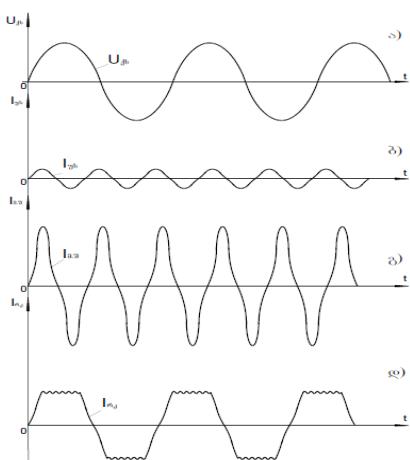


Рис. 1. Кривые тока и напряжения при разных режимах работы СЭДП:

а- напряжения; б- тока в режиме холостого хода; в - тока в режиме возгорания дуги (режим короткого замыкания);
г- тока в режиме устойчивого горения дуги

В связи с тем, что процесс плавления металла в печи протекает неравномерно, расплавленная масса находится в постоянном движении. Соответственно, постоянно меняются условия горения дуги и дуговой промежуток каждого электрода. Т.е. изменение тока СЭДП осуществляется на протяжении всего периода плавления по ранее неустановленному закону. Следовательно, в результате прохождения тока нагрузки СЭДП в элементах сети электроснабжения возникает три спектра гармоник высшего порядка напряжения (ГВП) различных параметров. При этом, значения амплитуды и частоты гармоник в каждом спектре зависят от действующих значений тока нагрузки соответ-

ствующего режима работы и степени искажения формы кривой тока. По этому, при решении вопросов ограничения ГВП необходимо применять во внимание три комплекта компенсирующих фильтров, настроенных на соответствующие частоты определённого режима работы [8].

Материалы исследования. Режимы работы СЭДП были исследованы на физической модели нагрузок в лаборатории электромагнитной совместимости департамента Технологий электропотребления Грузинского технического университета.

На рис. 1 показаны кривые тока и напряжения одной фазы рабочего цикла КЗ-ГД-П электродуговой печи. Из рисунка видно, что в режиме холостого хода, значение амплитуды тока мало, а форма кривой слегка искажена, но близка к синусоидальной. В процессе зажигания электрической дуги (в рабочем режиме КЗ) амплитуда тока максимальна, а форма кривой искажена. Значение амплитуды тока в установившемся режиме горения дуги значительно меньше, чем при режиме КЗ, а форма кривой тока сильно искажена. Кроме того, значение амплитуды и форма кривой тока нагрузки каждой фазы зависят от режима работы.

Вместе с этим, экспериментально были получены спектры высших гармоник, возникших при всех режимах работы цикла (рис. 2, 3, 4). Из полученных результатов видно, что на протяжении всего рабочего цикла СЭДП в элементах сети электроснабжения производит и распространяет три спектра ГВП с взаимно отличающимися параметрами, обусловленных токами режимов работы КЗ-ГД-П. Кроме этого, чередование спектров в каждой фазе не одновременно.

В связи с этим, для эффективного ограничения гармоник, необходимо использовать набор фильтров для компенсации разных ГВП спектра в каждой фазе. При этом, для снижения реактивной нагрузки фильтров и исключения резонансного явления в сети электроснабжения, в каждом режиме работы цикла, необходимо к сети подключить только один комплект фильтров настроенных на частотах ГВП соответствующего режима работы фазы. Также, в связи с тем, что, токи в электродах изменяются не одновременно, комплектами компенсирующих фильтров каждой фазы необходимо управлять непосредственно в функции тока и напряжения дугового промежутка собственного электрода.

Целью работы является выбор устройства для ограничения ГВП, создаваемых СЭДП, а также разработка системы управления устройства ограничения (УО) ГВП, реализующей независимое управление комплектов фильтрации каждой фазы в функции режимов цикла работы КЗ-ГД-П СЭДП.

Изложение основного материала. Для реализации поставленной цели – обоснованного выше принципа, в работе разработана система управления УО ГВП напряжения создаваемого трёхфазными СЭДП. Функциональная схема системы представлена на рисунке 5.

Принцип работы системы управления заключается в следующем.

При включении СЭДП к сети (режим холостого хода) ток на электродах равен нулю, а напряжение дугового промежутка является максимальным. При данном режиме системы управления MS_A , MS_B , MS_C бесконтактными выключателями (БВ) подключают к сети секции фильтров ГВП для режима холостого хода (пазы) F_{A3} , F_{B3} , F_{C3} посредством БВ C_{A3} , C_{B3} , C_{C3} .

То есть, к сети будут подключены только секции фильтров, предусмотренных для ГВП, преобладающих при режиме холостого хода. В результате этого зашунтируются соответствующие ГВП и значение амплитуды распространённые в элементы сети электроснабжения будут ограничены.

При коротком замыкании, в виду повышения тока в электродах до максимального значения и понижения напряжения до минимального, отключаются секции F_{A3} , F_{B3} , F_{C3} и подключаются только секции фильтров F_{A2} , F_{B2} или F_{C2} предусмотренных для ограничения ГВП в режиме КЗ в соответствующей фазе. В результате чего будет реализована компенсация ГВП появляющийся в режиме КЗ. Вскоре после окончания режима короткого замыкания и горения дуги секции F_{A2} , F_{B2} или F_{C2} будут отключены и вместо них к сети будут подключены только фильтры F_{A1} , F_{B1} или F_{C1} в соответствующих фазах, которые обеспечат компенсацию ГВП в режиме установившегося горения дуги.

При прекращении, в одной из фаз, горения дуги в электроде прекратится протекание тока. В результате будет отключена секция фильтра режима горения дуги и к сети автоматически подключится секция режима холостого хода.

Так же следует отметить, что секция фильтра для каждого режима оснащена двухчастотным фильтром ГВП, соответствующая параметрам режима. Таким образом, разработанная система управления УО ГВП, создаваемых трёхфазными СЭДП, секциям фильтров управляет в функции режимов работы цикла.

Выводы. На основе изучения принципа и режимов работы трёхфазных СЭДП установлено, что в каждой фазе сети СЭДП вырабатывают три постоянно меняющихся спектра ГВП для режимов холостого хода, короткого замыкания и устойчивого горения дуги.

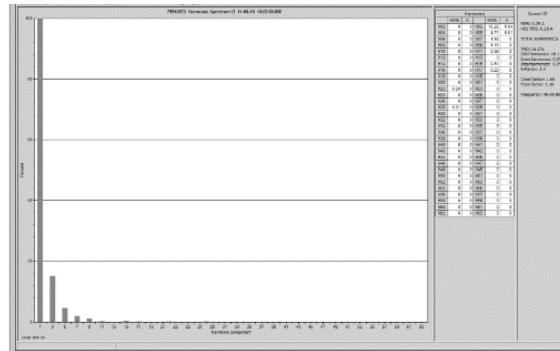


Рис. 2. Спектр высших гармоник в режиме паузы.

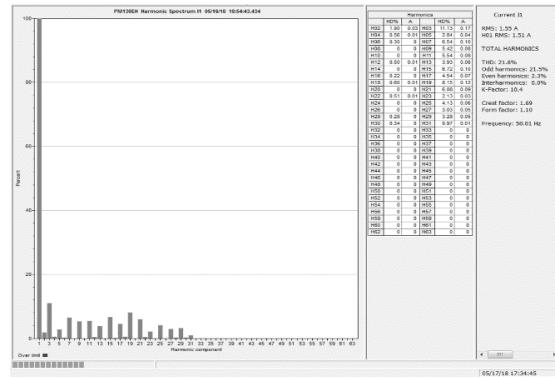


Рис. 3. Спектр высших гармоник в режиме К3.

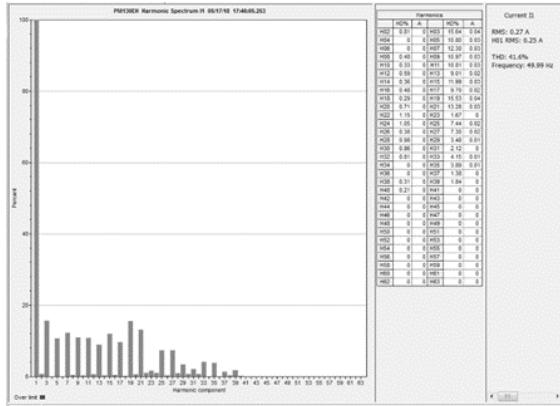


Рис. 4. Спектр высших гармоник в режиме устойчивого горения дуги.

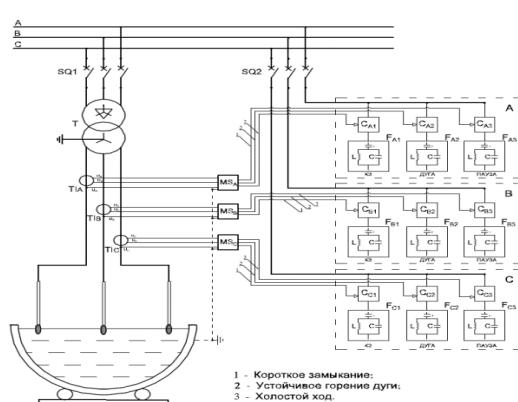


Рис. 5. Блок-схема системы управления устройства ограничения ГВП создаваемых трёхфазными СЭДП.

T-печной трансформатор; MS_A , MS_B , MS_C – системы управления фильтрами; F_{A1} , F_{A2} , F_{A3} , F_{B1} , F_{B2} , F_{B3} , F_{C1} , F_{C2} , F_{C3} – секции фильтров ГВП для режимов холостого хода, короткого замыкания и устойчивого горения дуги; C_{A1} , C_{A2} , C_{A3} , C_{B1} , C_{B2} , C_{B3} , C_{C1} , C_{C2} , C_{C3} – системы управления фильтров ГВП соответствующих фаз и режимов.

Поскольку чередование спектров в каждой фазе протекает не одновременно, в сети распространяющиеся гармоники являются асимметричными и имеют динамический характер.

Обосновано, что ограничения гармоник высокого порядка, генерируемых электродуговыми установками и распространяемых каждой их фазой в сеть, должно производится независимо.

Вместе с этим, для каждой фазы необходимо выбрать набор компенсирующих фильтров, настроенных на три разные частоты, соответствующих режиму работы цикла. При этом, каждый фильтр входящий в комплект, должен подключаться к сети только при предусмотренном режиме работы.

Разработана система управления для устройств ограничения гармоник высшего порядка, производимых электродуговыми установками, управление компенсационных устройств каждой фазы осуществляется в функциях тока нагрузки и напряжения дугового промежутка (т.е. в функции режимов цикла работы КЗ-ГД-П СЭДП).

Практическая реализация предоставленной в работе системы управления устройством ограничения ГВП СЭДП позволит разгрузить сети электроснабжения на 50÷60% от ГВП, что в свою очередь повысит энергетические показатели сети и её энергоэффективность в целом.

Список литературы

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
2. Вагин Г.Я., Севостьянов А.А Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник для вузов. Нижний Новгород: НГТУ, 2004. 214с.
3. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Управление качеством электроЗнергии. Москва: МЭИ, 2006. 320 с.
4. Руководство по устройству электроустановок: технические решения Schneider Electric. Москва: Schneider Electric Publisher, 2007, 394 с.
5. Шеховцев В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование: учебник. Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2004. 407 с.
6. Чунашвили Б.М., Петросян А.М., Гамрекелашвили Т.Г., Харебава Д.Н. Исследование симметричности гармоник высшего порядка, возникающих в сети при работе электропотребителей. Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития: Сб. трудов IV Междунар. научн. конф. 2015. Кутаиси: Государственный университет Акакия Церетели, 2016. С. 5 – 8.
7. Чунашвили Б.М., Шавелашвили Г.В., Бежанишвили Дж.Г., Гамрекелашвили Т.Г. Оценка влияния гармоник высшего порядка на электропотребителей. Энергия. Тбилиси: Грузинская академия энергетики. 2017, №3 (80). С. 22 – 27.
8. Чунашвили Б.М., Петросян А.М., Гамрекелашвили Т.Г., Тугushi M.A. Системы управления ограничивающими фильтрами высших гармоник напряжения электротехнологических установок с управляемыми выпрямителями. Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития: Сб. трудов VI Междунар. научн. конф. 2018. Кутаиси: Государственный университет Акакия Церетели, 2018. С. 58 – 61.

References (transliterated)

1. ZHezelenko I.V. Vyssie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatiij [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moskva: Energoatomizdat, 2000. 331 p.
2. Vagin G.YA., Sevost'yanov A.A Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike: uchebnik dlya vuzov [Electromagnetic compatibility in the electric power industry: university textbook]. Nizhnij Novgorod: NGTU, 2004. 214 p.
3. Kartashov I.I., Tul'skij V.N., SHamonov R.G. Upravlenie kachestvom elektroenergii [Power quality management]. Moskva: MEI, 2006. 320 p.
4. Rukovodstvo po ustrojstvu elektrostanovok: tekhnicheskie resheniya schneider electric [Electrical installation guide: Schneider Electric technical solutions]. Moskva: Schneider Electric Publisher, 2007, 394 p.
5. SHekhovcev V.P. Elektricheskoe i elektromekhanicheskoe oborudovanie: uchebnik [Electrical and electromechanical equipment: a textbook]. Moskva: FORUM; INFRA-M, 2004. 407 p.
6. CHunashvili B.M., Petrosyan A.M., Gamrakelashvili T.G., Harebava D.N. Issledovanie simmetrichnosti garmonik vysshego poryadka, voznikayushchih v seti pri rabote elektpotrebitelej [The study of the symmetry of higher order harmonics arising in the network during the operation of electrical consumers]. Energetika: regional'nye problemy i perspektivy razvitiya: Sb. tr. IV Mezhdunar. nauchn. konf. 2015 r., Kutaisi [Energy: regional problems and development prospects: Collection of works of the IV International Scientific Conference]. Kutaisi: Gosudarstvennyj universitet Akakiya Cereteli, 2016. pp. 5 – 8.
7. CHunashvili B.M., SHavelashvili G.V., Bezhaniashvili Dzh.G., Gamrakelashvili T.G. Ocena vliyanija garmonik vysshego poryadka na elektpotrebitelej [Assessment of the influence of higher order harmonics on electrical consumers]. Energiya [Energy]. Tbilisi: Gruzinskaya akademiya energetiki. 2017, №3 (80). pp. 22 – 27.
8. CHunashvili B.M., Petrosyan A.M., Gamrakelashvili T.G., Tugushi M.A. Sistemy upravleniya ogranicivayushchimi fil'trov vysshikh garmonik napryazheniya elektrotehnologicheskikh ustanovok s upravlyayemymi vypryamitelyami [Control systems for limiting filters of higher voltage harmonics of electrotechnological installations with controlled rectifiers]. Energetika: regional'nye problemy i perspektivy razvitiya: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauchn. konf. 2018 r., Kutaisi [Energy: regional problems and development prospects: Collection of works of the VI International Scientific Conference]. Kutaisi: Gosudarstvennyj universitet Akakiya Cereteli, 2018. pp. 58 – 61.

Поступила 10.12.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About of the Authors

Чунашвілі Бадур Михайлович (Чунашвили Бадур Михайлович, Badur Tchunashvili) - доктор технічних наук, професор, Грузинський технічний університет, начальник департаменту технології електроспоживання; м. Тбілісі, Грузія; e-mail: btchunashvili@yahoo.com

Петросян Олександр Михайлович (Петросян Олександр Михайлович, Petrosyan Alexander) - академічний доктор, Грузинський технічний університет, асоційований професор; м. Тбілісі, Грузія; e-mail: a.petrosyan@gtu.ge

Гамрекелашвілі Теймураз Гівієвіч (Гамрекелашвили Теймураз Гивиевич, Teimuraz GamrekelaSvili) – академічний доктор, Грузинський технічний університет, асистент професора; м. Тбілісі, Грузія; e-mail: temo.gamrakelashvili@gmail.com

C. C. МИХАЙКОВ

ПРИСТРІЙ КЕРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗІ ПЛК

У роботі представлено пристрій керування навантаженням на базі ПЛК ALPHA2 фірми Mitsubishi Electric, який є частиною електромеханічного стенду з оцінки якості електроенергії суднової електромережі та енергоефективності роботи частотно-регульованого електропривода. В якості об'єкта дослідження розглядається електропривод системи охолодження дизель-генераторів з частотним регулюванням фірми Danfoss типу VLT AQUA Drive потужністю 48,5 кВт. Експериментальні дослідження було проведено у лабораторних умовах з використанням розробленого електромеханічного стенда. Запропонований пристрій керування навантаженням забезпечує два режими управління: ручний та автоматичний. Програмування пристрою керування навантаженням здійснено у програмному середовищі AL-PCS/WIN-EU фірми Mitsubishi Electric на мові функціональних блок-діаграм (FBD). Для отримання показників якості електроенергії та показників енергоефективності роботи електропривода використано багатофункціональний пристрій Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS фірми Mitsubishi Electric. Проведені експериментальні дослідження засвідчили, що розроблений пристрій керування навантаженням є зручним інструментом для проведення детального аналізу якості електромережі та оцінки енергоефективності роботи електропривода.

Ключові слова: якість електроенергії, енергоефективність роботи електропривода, частотний перетворювач, асинхронний двигун, програмований логічний контролер (ПЛК), змінне навантаження, сумарний коефіцієнт гармонік (THD), коефіцієнт потужності.

C. C. МИХАЙКОВ

УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ НАГРУЗКОЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ПЛК

В работе представлено устройство управления нагрузкой на базе ПЛК ALPHA2 фирмы Mitsubishi Electric, которое является частью электромеханического стенда по оценке качества электроэнергии судовой электросети и энергоэффективности работы частотно-регулируемого электропривода. В качестве объекта исследования рассматривается электропривод системы охлаждения дизель-генераторов с частотным регулированием фирмы Danfoss типа VLT AQUA Drive мощностью 48,5 кВт. Экспериментальные исследования были проведены в лабораторных условиях с использованием разработанного электромеханического стенда. Предлагаемое устройство управления обеспечивает два режима управления: ручной и автоматический. Программирование устройства управления нагрузкой проведено в программной среде AL-PCS / WIN-EU на языке функциональных блок-диаграмм (FBD). Для получения показателей качества электроэнергии и показателей энергоэффективности работы электропривода использовано многофункциональное устройство Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS фирмы Mitsubishi Electric. Полученные экспериментальные исследования подтвердили, что разработанное устройство управления нагрузкой является удобным инструментом для проведения детального анализа качества электросети и оценки энергоэффективности работы электропривода.

Ключевые слова: качество электроэнергии, энергоэффективность работы электропривода, частотный преобразователь, асинхронный двигатель, программируемый логический контроллер (ПЛК), переменная нагрузка, суммарный коэффициент гармоник (THD), коэффициент мощности.

S. S. MIKHAYKOV

THE LOAD CONTROL DEVICE OF THE VARIABLE FREQUENCY DRIVE ON THE BASIS OF PLC

The work presents the load control device for the variable frequency drive (VFD) based on the ALPHA2 PLC produced by Mitsubishi Electric, which is the part of an electromechanical stand for assessment of an electricity quality of the ship's electrical network and VFD energy efficiency. As an object of study, we are considering an electric drive of the diesel generators cooling system with frequency converter made by Danfoss type VLT AQUA Drive with a capacity of 48.5 kW. Experimental studies were carried out in laboratory conditions using the developed electromechanical stand. The proposed control device provides two control modes: manual and automatic. The load control device was programmed in the AL-PCS / WIN-EU software environment in the language of functional block diagrams (FBD). To obtain indicators of electric power quality and energy efficiency indicators of electric drive operation, an Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS was used. The conducted experimental studies have confirmed the feasibility of using the developed VFD load control device for a detailed analysis of the quality of the electric network and assess the energy efficiency of the drive.

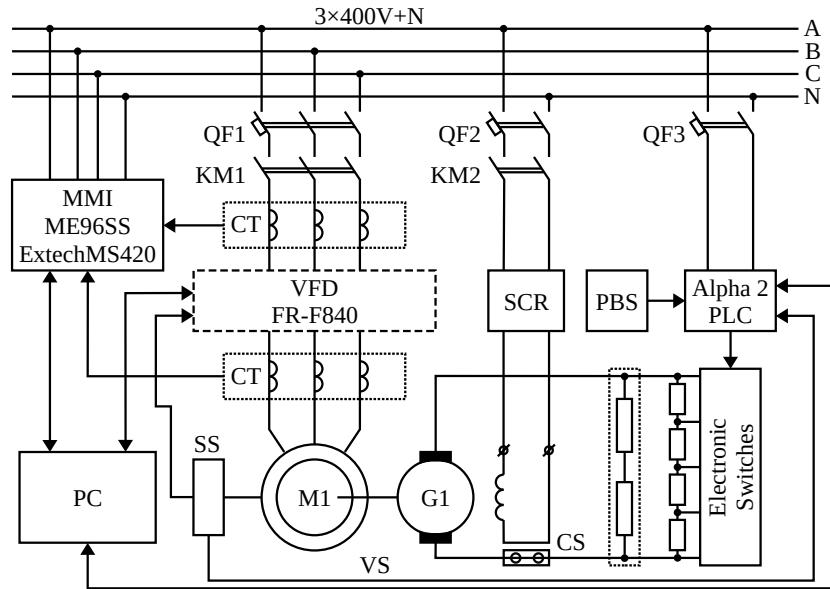
Keywords: power quality, energy efficiency of electric drive, frequency converter, induction motor, programmable logic controller (PLC), variable load, total harmonic distortion (THD), power factor

Вступ. Частотно - регульований електропривод (ЧРП) є невід'ємною складовою при проектуванні сучасних суднових систем і комплексів, де широко використовуються енерго- і ресурсозберігаючі технології [1,2]. В роботі розглядається ЧРП системи охолодження дизель-генераторів, який є частиною загально-суднової системи охолодження. Зміна продуктивності системи охолодження дизель-генераторів забезпечується частотними перетворювачами типу VLT AQUA Drive фірми Danfoss задля підтримки режимних параметрів приводних двигунів дизель-генераторів. Дослідження та аналіз експлуатаційних режимів

роботи суднових турбомеханізмів з частотно-регульованими електроприводами у реальних умовах при змінному навантаженні є актуальним науковим і практичним завданням.

Для оцінки якості електромережі та проведення експериментів з дослідження показників енергоефективності частотно-керованого електроприводу суднових турбомеханізмів на кафедрі суднової електромеханіки і електротехніки Національного університету «Одесська морська академія» було проведено модернізацію електромеханічного лабораторного стенду, функціональна схема якого представлена на рис. 1 [3,4].

© С. С. Михайков, 2020



SCR – silicon controlled rectifier;
CS – current sensor;
VS – voltage sensor;
SS – speed sensor;
CT – current transformers
before & after VFD;
VFD – variable frequency drive;
PBS – push button station.

Рис. 1. Функціональна схема електромеханічного лабораторного стенду з ЧРП

Імітатором навантаження для асинхронного двигуна (АД) був генератор постійного струму з незалежним збудженням. Комутація резисторів навантаження генератора і відповідно асинхронного двигуна здійснювалась за алгоритмом, що забезпечував типовий характер навантаження турбомеханізмів, який реалізовано за допомогою ПЛК Alpha2, електронних твердо-тільних реле та давача частоти обертання машинного агрегату.

Мета дослідження. Оцінка показників якості електромережі та енергоефективності частотно-регульованого електропривода суднових насосів забортної води при змінному навантаженні. У експериментальному дослідженні реєструвались наступні показники якості електромережі: відхилення напруги, відхилення частоти, несиметрія напруги, несинусоїдальність напруги. Коефіцієнт потужності та коефіцієнт кори-

сної дії використовувались як показники енергоефективності роботи електроприводу.

Методи дослідження. Для забезпечення зміни на вантаження було розроблено пристрій керування навантаженням асинхронного двигуна, який забезпечує зміну навантаження асинхронного двигуна у відповідності до роботи електропривода насосу забортної води у реальних експлуатаційних режимах.

Принципова схема пристроя керування навантаженням асинхронного двигуна з використанням ПЛК ALPHA2 зображена на рис. 2.

У пристрой використано ПЛК модифікації AL2-14-MR-D без адаптерних модулів, який має вісім каналів введення та 6 каналів виводу. Живлення ПЛК здійснено від зовнішнього джерела 24В постійного струму [5]. Пристрій забезпечує два режими роботи: ручний та автоматичний (Static/Dynamic).

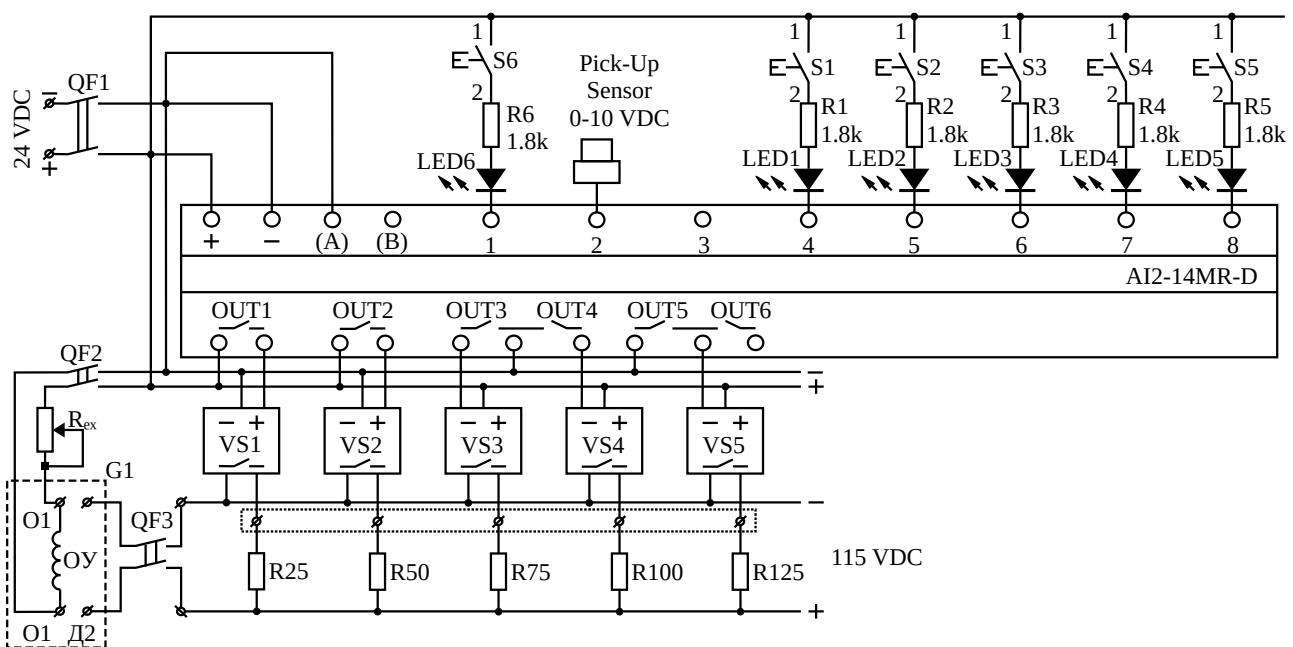


Рис. 2. Принципова схема пристроя керування навантаженням АД

В обох режимах канали виводу (O01 ÷ O05) контролера комутують відповідну ступень активного резисторного навантаження за допомогою напівпровідникових реле. Дискретні канали введення I04 ÷ I08 відповідають обраному відсотку навантаження (25%, 50%, 75%, 100%, 125%), яке підключено до якірного кола генератора G1 та навантажувальних резисторів R25 ÷ R125. Ручний режим дозволяє навантажити асинхронний двигун у вигляді ступенів обраного навантаження, а автоматичний режим налаштовується на типовий характер навантаження з урахуванням сигналу датчика обертів асинхронного двигуна (Pick-Up Sensor). Analogovий сигнал від датчика обертів подається на канал введення I02.

Програмування ПЛК ALPHA2 здійснено на мові функціональних блок-діаграм (FBD) у програмному середовищі AL-PCS/WIN-E, рис. 3 [6]. Програма використовує логічні блоки, блоки затримки, тригерні блоки та блок DINAMIC UNIT, який створено для забезпечення автоматичного режиму керування навантаженням. Логіка програми налаштована на пріоритетне опитування датчика обертів у автоматичному режимі. У ручному режимі вибір навантаження (25%, 50%, 75% та 100%) здійснюється при натисканні на відповідні кнопки (I04, I05, I06, I07). Кнопка режиму перенавантаження (125%) підключена до каналу введення I08. Програма має один резервний канал введення та один резервний канал виводу.

У лабораторному стенді використано перетворювач частоти (ПЧ) VFD FR-F840 фірми Mitsubishi Electric [7] та електромашинний підсилювач ЭМУ-12А з приводним асинхронним двигуном потужністю споживання 1,68 кВт.

Стенд облаштовано багатофункціональним вимірювальним пристроєм Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS фірми Mitsubishi Electric [8], завдяки якому отримуються значення діючих та миттєвих напруг, струмів; значення активної, реактивної та повної потужностей; значення коефіцієнту потужності, а також показники якості електромережі (THD_U та THD_I).

Результати моделювання. Проведені експерименти дозволили отримати кількісні показники якості електроенергії та оцінити енергоефективність роботи електропривода у цілому. Графік залежності коефіцієнта потужності від зміни навантаження (рис. 4) демонструє, що середнє значення коефіцієнта потужності електромережі коливається від 0,78 до 0,95 та має тенденцію до зменшення при зростанні навантаження. Середнє значення коефіцієнта потужності становить 0,83. Також можна зауважити, що коефіцієнт потужності електромережі при номінальному навантаженні не суттєво залежить від зміни частоти перетворювача при законі управління $U/f = \text{const}$. В ході експериментів були отримані сумарні коефіцієнти спотворення напруги з боку електромережі та сумарні коефіцієнти спотворення струму – з боку асинхронного електродвигуна (на виході ПЧ), на всьому діапазоні навантаження, включно з режимом перевантаження (125%).

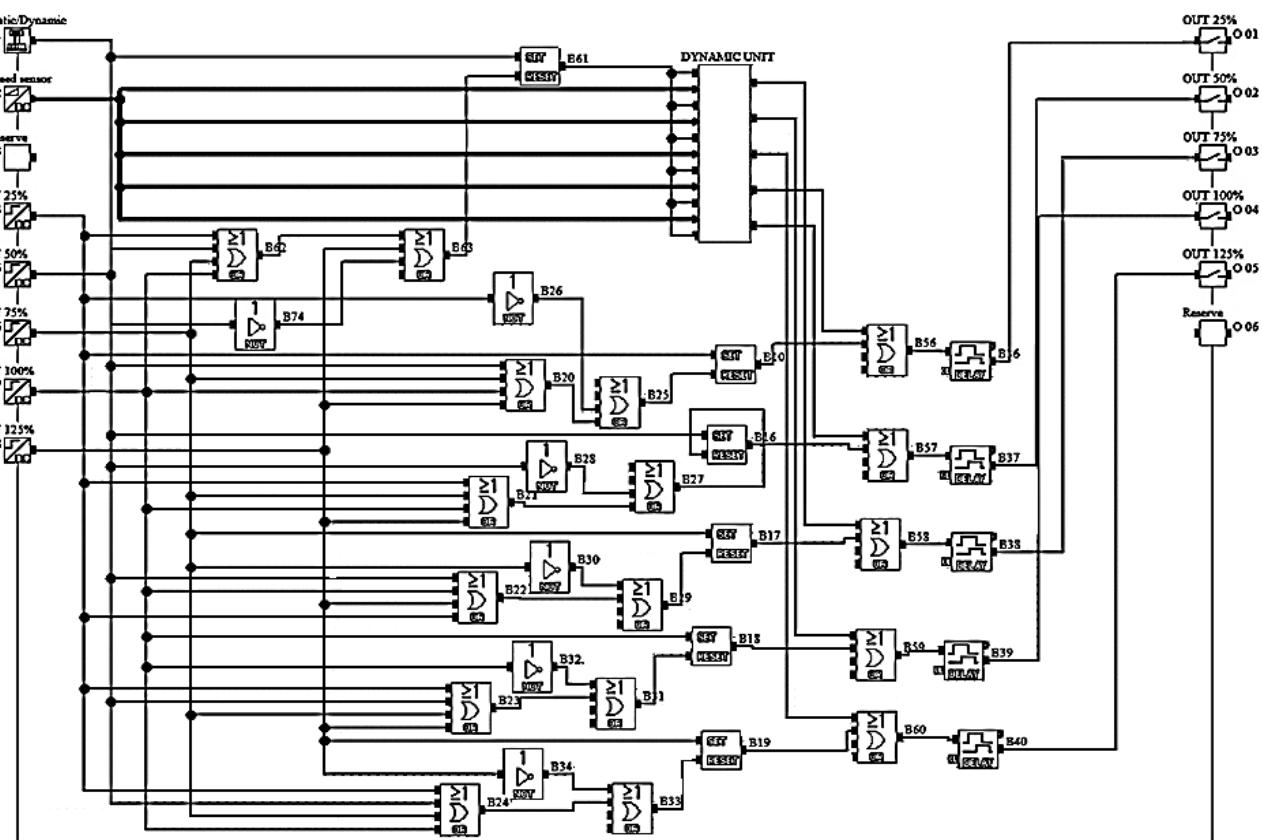


Рис. 3. Програми керування навантаженням на мові функціональних блок-діаграм (FBD)

Сумарний коефіцієнт спотворень напруги THD_U (рис. 5) відповідає вимогам морських Класифікаційних Товариств до якості суднової електромережі [9] та має значення менш 5%.

Чисельні значення THD_U лежать у межах з 3,97% до 3,77%. Середнє значення THD_U є 3,83%. Сумарний коефіцієнт спотворень струму THD_I (рис. 6) коливається в межах від 2,66% до 4,33%, що свідчить про синусоїдність живлючого струму АД. Середнє значення THD_I є 3,36%. Отримані графічні залежності показують, що THD_U зменшується при зміні навантаження на 5%, а THD_I – на 15%. На протязі експериментів була зафіксована фазна несиметрія за напругою, яка становить 3÷4%.

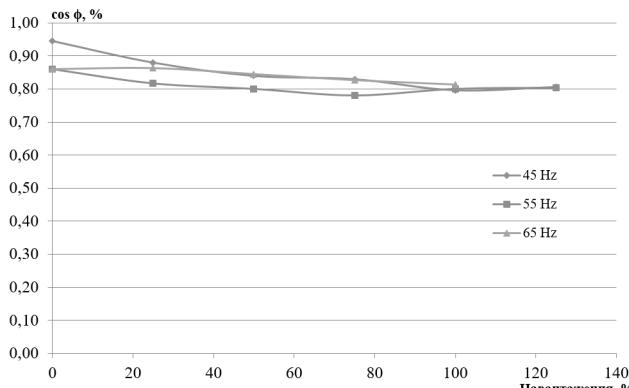


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта потужності від навантаження

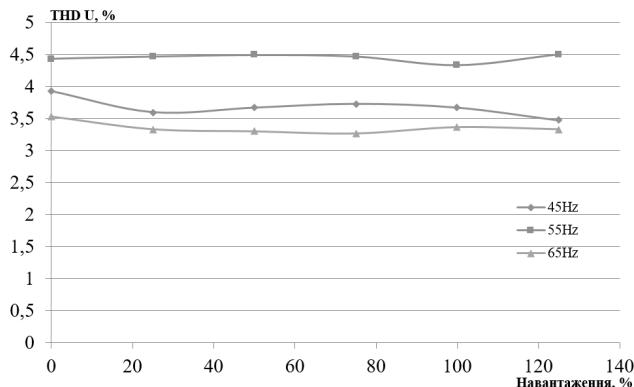


Рис. 5. Графік залежності THD_U від навантаження

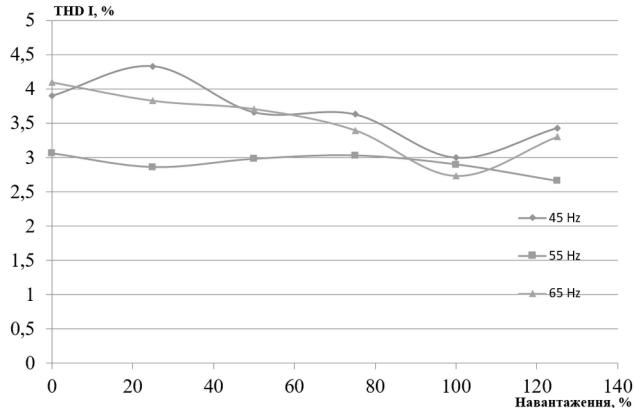


Рис. 6. Графік залежності THD_I від навантаження

Використання багатофункціонального пристрою Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS дозволило отримати кількісні показники гармонійного складу напруги (табл. 1).

Рівень 3-ої гармоніки напруги складає більше 3%, що свідчить про наявність у електромережі люмінесцентних ламп освітлення.

Таблиця 1. Кількісні показники гармонійного складу напруги

Гармоніка напруги / навантаження, %	25%	50%	75%	100%	125%
3-я гармоніка	3,23	3,33	3,4	3,3	3,13
5-а гармоніка	0,9	0,9	0,93	0,83	0,7
7-а гармоніка	0,4	0,5	0,7	0,63	0,66
11-а гармоніка	0,133	0,16	0,2	0,26	0,36
13- гармоніка	0,43	0,4	0,4	0,33	0,3

Висновки. Проведені експериментальні дослідження довели, що електромеханічний стенд з пристроям керування навантаженням частотно-регульованого електропривода на базі ПЛК ALPHA2 може використовуватися для дослідження якості електромережі та енергоефективності роботи електроприводу. Типовий характер навантаження електроприводів забезпечується перепрограмуванням ПЛК. Отримані результати дозволяють провести детальний аналіз якості електромережі та дати оцінку енергоефективності роботи електроприводу.

Список літератури

- Дранкова А.О., Муха М.Й., Міхайков С.С., Красовський І.І. Підвищення якості електроенергії шляхом використання пасивної фільтрації в електромеханічних системах з нелінійним навантаженням. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Одеса: Астрапрінт. 2018, №27 (103). С.118 – 124.
- Петрушин В.С., Еноктаев Р.Н., Шестаков О.И., Прокопенко Н.С. Учет потерь от высших гармонических в регулируемых асинхронных двигателях. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворювання енергії. Харків: НТУ «ХПІ», 2001, №1 (1223). С. 101 – 105.
- Drankova A., Mukha M., Mikhaykov S., Krasovskyi I. Electromechanical laboratory complex for power quality studies of the ship electrical system. *Proceedings of the 20th International conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Lviv-Slavskie: Lviv Polytechnic National University, Ukraine, 15-18 September, 2019. DOI: 10.1109/CPEE47179.2019.8949147.
- Муха Н., Дранкова А. Полномасштабный тренажерный комплекс судовой автоматизированной электроэнергетической системы для подготовки судовых электромехаников и механиков. *Modern problems of power engineering and ways of solving them: Materials of the 1th International scientific and technological conference 07-11 October 2019*. Tbilisi: Georgian Academy of Power Engineering, 2019, Part I. №3 (91). pp. 42 – 47.
- Руководство по аппаратной части: простые прикладные контроллеры a2 Mitsubishi Electric. URL: https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/mymitsubishi/download_manager?id=1673. (дата обращения 15.12.2019).
- Руководство по программному обеспечению: простые прикладные контроллеры a2 Mitsubishi Electric. URL: <http://www.sovras.com/images/File/prman2.pdf>. (дата обращения 15.12.2019).
- Семейство FR. Преобразователи частоты Mitsubishi Electric: каталог. URL: https://www.plcsystems.ru/catalog/Mitsubishi/doc/FR-Family_spec_rus.pdf. (дата обращения 15.12.2019).

8. Electronic multi-measuring instrument model ME96SSRA-MB: user's manual. URL: <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/pmd/ym-i-ib63c45/ib63c45a.pdf>. (дата обращения 15.12.2019).
9. Prousalidis J., Styvaktakis E., Hatzilau I.K., Kanellos F., Perros S. Sofras E. Electric power supply quality in ship systems: an overview. *International Journal of Ocean Systems Management*. 2008, Vol. 1, №1. pp.68 – 83.
5. Rukovodstvo po apparatnoj chasti: prostye prikladnye kontrollery α2 Mitsubishi Electric [Hardware manual: α2 simple application controller Mitsubishi Electric]. URL: https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/mymitsubishi/download_manager?id=1673. (accessed 15.12.2019).
6. Rukovodstvo po programmnomu obespecheniyu: prostye prikladnye kontrollery α2 Mitsubishi Electric [Software manual: α2 Simple Application Controllers]. URL: <http://www.sovras.com/images/File/prman2.pdf>. (accessed 15.12.2019).
7. Semejstvo FR. Preobrazovateli chastoty Mitsubishi Electric: katalog [Family FR. Mitsubishi Electric frequency converters: catalogue]. URL: https://www.plcsystems.ru/catalog/Mitsubishi/doc/FR-Family_spec_rus.pdf. (accessed 15.12.2019).
8. Electronic multi-measuring instrument model ME96SSRA-MB: user's manual. URL: <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/pmd/ym-i-ib63c45/ib63c45a.pdf>. (accessed 15.12.2019).
9. Prousalidis J., Styvaktakis E., Hatzilau I.K., Kanellos F., Perros S. Sofras E. Electric power supply quality in ship systems: an overview. *International Journal of Ocean Systems Management*. 2008. Vol. 1, №1. pp.68 – 83.

References (transliterated)

1. Drankova A.O., Mukha M.I., Mikhaiikov S.S., Krasovskyi I.I. *Pidvyshchennia yakosti elektroenerhii shliakhom vykorystannia pasyynoi filtratsii v elektromekhanichnykh systemakh z neliniyuym navantazhennia* [Methods to improve the quality of electrical supply of ship system with nonlinear load]. *Elektrotehnichni ta kompiuterni sistemy* [Electrotechnic and computer systems]. Odesa: Astroprint. 2018, №27 (103). pp. 118 – 124.
2. Petrushin V.S., Enoktaev R.N., SHestakov O.I., Prokopenko N.S. Uchet poter' ot vysshih garmonicheskikh v reguliruemyh asinhronnyh dvigatelyah [Allowance for loss of the higher harmonic in the controlled induction motors]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «Kharkivskyi politeknichnyi instytut»*. Ser.: *Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvoruvannia energii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, №1(1223). pp. 101 – 105.
3. Drankova A, Mukha M., Mikhaykov S., Krasovskyi I. Electromechanical laboratory complex for power quality studies of the ship electrical system. *Proceedings of the 20th International conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Lviv-Slavsk: Lviv Polytechnic National University, Ukraine, 15-18 September, 2019. DOI: 10.1109/CPEE47179.2019.8949147.
4. Muha N., Drankova A. Polnomasshtabnyj trenazhernyj kompleks sudovoj avtomatizirovannoj elektroenergeticheskoy sistemy dlya podgotovki sudovyh elektromekhanikov i mehanikov [A full-scale simulator complex for a ship automated electric power system for training ship electricians and mechanics]. *Modern problems of power engineering and ways of solving them: Materials of the 1th International scientific and technological conference 07-11 October 2019 r.* Tbilisi: Georgian Academy of Power Engineering, 2019, Part I. №3 (91). pp. 42 – 47.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Михайков Сергій Сергійович (Михайков Сергей Сергеевич, Mikhaykov Sergiy) – магістр електромеханіки, компанія «Stolt Tankers LTD», судновий електромеханік; м. Одеса, Україна; e-mail: pilot.vodolaz@gmail.com

Поступила 09.01.2020

Л. В. АСМОЛОВА, М. В. АНИЩЕНКО

ЛОКАЦІЙНІ ДАТЧИКИ НА ПЛАТИ «СЕНСОРИ МЕХАТРОНІКИ» НА БАЗІ ОСВІТНЬОЇ ПЛАТФОРМИ NATIONAL INSTRUMENTS

Розглядається організація циклу лабораторних робіт з курсу «Основи мехатроніки» з використанням плати QNET «Mechatronics Sensors» та освітньої платформи NI ELVIS II +, за допомогою якої студент отримує фундаментальні знання в мехатроніці. Пропонуються датчики вимірювання відстані до об'єктів та розміру об'єктів, виявлення перешкод і т.п. для промислових роботів та пристрій мехатроніки. В якості сенсорів зовнішнього середовища використовуються інфрачервоний та ультразвуковий (сонар) локаційні датчики. Для їх дослідження розроблено методику виконання лабораторних робіт. Викладено призначення та принцип роботи локаційних датчиків близької дії для виміру відстані до контролюваного об'єкту без безпосереднього контакту з ним. В якості об'єкту дослідження розглядався щільний шматок картону, розміром 10×10 см білого відбивного кольору. Відзначено, що принцип дії інфрачервоного датчика заснований на відстеженні рівня інфрачервоного випромінювання в полі зору датчика, а ультразвукові датчики (сонар) працюють на принципі ехолокації ультразвуком, тобто посилають звукові хвилі високої частоти. Вихідний сигнал датчиків у вигляді аналогової напруги за допомогою мікроконтролера перетворюється у величину відстані. Для кожного типу датчика виконано вимір робочого діапазону та калібрування для збільшення точності вимірювання відстані. Робочий діапазон інфрачервоного датчика складає $17 \div 47$ см, а ультразвукового – $20 \div 43$ см. Відносна похибка інфрачервоного датчика дорівнює 1,53%, а ультразвукового – 0,25%. При виконанні лабораторної роботи наочно показано, що відстань до навколоїшніх предметів можна вимірювати як за допомогою ультразвукових датчиків (сонарів), так і за допомогою інфрачервоних датчиків. Вибір того чи іншого типу датчика залежить від поставленого завдання та області використання.

Ключові слова: віртуальний прилад, локаційні сенсори, інфрачервоний датчик, ультразвуковий датчик.

Л. В. АСМОЛОВА, Н. В. АНИЩЕНКО

ЛОКАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ НА ПЛАТЕ «СЕНСОРЫ МЕХАТРОНИКИ» НА БАЗЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ NATIONAL INSTRUMENTS

Рассматривается организация цикла лабораторных работ по курсу «Основы мехатроники» с использованием платы QNET «Mechatronics Sensors» и образовательной платформы NI ELVIS II +, с помощью которой студент получает фундаментальные знания в мехатронике. Предлагаются датчики измерения расстояния до объектов и размера объектов, обнаружения преград и т.п. для промышленных роботов и устройств мехатроники. В качестве сенсоров внешней среды используются инфракрасный и ультразвуковой (сонар) локационные датчики. Для их исследования разработана методика выполнения лабораторных работ. Приведено назначение и принцип работы локационных датчиков близкого действия для измерения расстояния до контролируемого объекта без непосредственного контакта с ним. В качестве объекта исследования использовался плотный кусок картона, размером 10×10 см белого отражающего цвета. Отмечено, что принцип действия инфракрасного датчика основан на слежении за уровнем инфракрасного излучения в поле действия датчика, а ультразвуковые датчики (сонар) работают на принципе эхолокации ультразвуком, то есть посыпают звуковые волны высокой частоты. Выходной сигнал датчиков в виде аналогового напряжения при помощи микроконтроллера преобразовывается в величину расстояния. Для каждого типа датчика выполнены измерения рабочего диапазона и калибровка для повышения точности измерения расстояния. Рабочий диапазон инфракрасного датчика составляет $17\text{--}47$ см, а ультразвукового – $20\text{--}43$ см. Относительная ошибка инфракрасного датчика равна 1,53%, а ультразвукового – 0,25%. При выполнении лабораторной работы наглядно показано, что расстояние до окружающих предметов можно измерять как при помощи ультразвуковых датчиков (сонаров), так и при помощи инфракрасных датчиков. Выбор того или иного типа датчика зависит от поставленной задачи и области применения.

Ключевые слова: виртуальный прибор, локационные сенсоры, инфракрасный датчик, ультразвуковой датчик.

L. V. ASMOLOVA, M. V. ANISHCHENKO

LOCATION SENSORS ON THE BOARD «MECHATRONICS SENSORS» ON THE BASIS OF THE NATIONAL INSTRUMENTS EDUCATION PLATFORM

The organization of a laboratory work cycle on the course "Fundamentals of Mechatronics" is considered. The QNET Mechatronics Sensors board and the NI ELVIS II + educational platform are used, with which the student receives fundamental knowledge in mechatronics. The sensors proposed in the article are used in industrial robots and mechatronics to measure the distance to objects and the size of objects, detect obstacles, etc. Infrared and ultrasonic (sonar) location sensors are used as external environmental sensors. For their research, a laboratory procedure was developed. The purpose and principle of operation of short-range location sensors for measuring the distance to a controlled object without direct contact with it are given. As the object of study, we used dense cardboard in white reflective color with a size of 10×10 cm. It is noted that the principle of operation of the infrared sensor is based on monitoring the level of infrared radiation in the zone of its action. Ultrasonic sensors (sonar) operate on the principle of ultrasonic echolocation, that is, they send high-frequency sound waves. The output of the sensors is an analog voltage. The microcontroller converts it into a distance value. For each type of sensor, measurements of the operating range and calibration were performed to increase the accuracy of distance measurement. The working range of the infrared sensor is $17\text{--}47$ cm, and the ultrasonic - $20\text{--}43$ cm. The relative error of the infrared sensor is 1.53%, and that of the ultrasound is 0.25%. When performing laboratory work, it was clearly shown that the distance to surrounding objects can be measured both by ultrasonic sensors (sonar) and by infrared sensors. The choice of one or another type of sensor depends on the task and the field of application.

Keywords: virtual instrument, location sensors, infrared sensor, ultrasonic sensor.

Вступ. В [1] наведено описання лабораторних робіт з курсу «Основи мехатроніки» для вивчення принципу дії, застосування та дослідження властивостей енкодера і потенціометра в якості датчиків вимірювання кутового положення мехатронних та робототехнічних систем і представлена результати дослідження. Енкодер і потенціометр є сенсорами внутрішнього ста ну виконавчих систем пристрій мехатроніки та роботів і маніпуляторів.

Другу групу сенсорів складають сенсорні системи зовнішнього середовища. Інформація від цих сенсорів використовується системою керування для виявлення і розпізнавання об'єктів зовнішнього середовища, та керування рухом роботів та інших мехатронічних систем [2].

В залежності від дальності дії сенсорні системи можна поділити на контактні, близької і дальньої дії. Сенсорні системи близької дії забезпечують отримання інформації про об'єкти що знаходяться безпосередньо поблизу робочого органу пристроя мехатроніки або робота, тобто на відстані, яка порівнянна з його розмірами.

До сенсорних систем близької дії відносять локаційні датчики. Ці сенсори використовують для вимірювання відстані до об'єктів, виявлення перешкод, швидкості руху і розміру об'єктів. Вони необхідні для наведення захватного пристроя робота на об'єкти що рухаються та неоріентовані, перешкоджання зіткненю мобільних роботів з перешкодами, визначення координат об'єктів і роботів [2].

Мета роботи. Описання лабораторних робіт з курсу «Основи мехатроніки» для вивчення принципу дії та дослідження властивостей локаційних сенсорів за допомогою інфрачервоного і ультразвукового датчиків та представлення деяких результатів дослідження.

Лабораторна робота «Вимірювання відстані до об'єкту за допомогою інфрачервоного датчика»

Мета роботи: виконання градуування і калібрування інфрачервоного датчика на платі модуля QNET MECHKIT та вимірювання відстані до об'єкту.

Задачі цієї роботи включають:

- ознайомлення з принципом дії інфрачервоного датчика на прикладі сенсора типу Sharp 2Y0A02. Сенсори цього типу використовуються для безконтактного визначення присутності об'єктів і точного безконтактного вимірювання положення руки робота та ін. Діапазон вимірювання відстані 20-150 см [3];

- підготовку до проведення експерименту на макетній платі QNET Mechatronics Sensors модуля MECHKIT: наявність джамперу J10 в положенні «Infrared» (інфрачервоний датчик); включення живлення установки NI ELVIS-II та відкриття програми VI QNET_MECHKIT_Infrared.vi [4];

- виконання лабораторної роботи та визначення робочого діапазону вимірювання відстані датчика [5].

На рис. 1 показано зовнішній вигляд інфрачервоного датчика типу SHARP 2Y0A02, який складається з інфрачервоного світлодіода IR LED, детектора і схеми обробки сигналу. Він видає аналогову напругу яка обернено пропорційна відстані до об'єкту.



Рис. 1. Зовнішній вигляд інфрачервоного датчика типу SHARP 2Y0A02

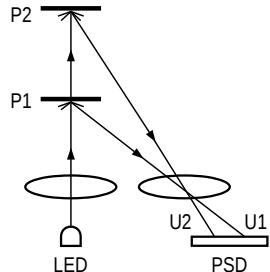


Рис. 2. Шлях світлового променя IR вимірювача відстані

IR LED з лінзою (рис. 2) випромінює вузький світловий промінь. Відбитий від об'єкта промінь прямує через іншу лінзу на позиційно-чутливий фотоелемент (англійською – position-sensitive detector, скорочено PSD). Від місця розташування падаючого на PSD променя, залежить його провідність. Провідність перетворюється в напругу і, перераховується аналого-цифровим перетворювачем мікроконтролера у відстань.

Графік залежності між вихідною напругою Output voltage і вимірюваною відстанню Distance to reflective object для білого і сірого паперу подано на рис. 3 [6].

Цей графік не є лінійним, однак графік зворотної величини вихідної напруги від відстані майже лінійний. Показання датчика залежать від відбивної здатності об'єкту, його форми та розмірів. В лабораторній роботі об'єктом дослідження був цільний шматок картону, розміром 10 × 10 см білого відбивного кольору, який пересувався повільно спочатку до інфрачервоного датчика, а потім від нього. Значення відстані між об'єктом та інфрачервоним датчиком записувалося до масиву даних Target range (cm), а відповідне вимірюване значення напруги на виході датчика – до масиву Sensor measurement (V) (на рис. 4 виділено колом 1). Було виконано 7 вимірювань положення об'єкта в діапазоні від 17 см до 47 см.

За результатами досліджень побудована залежність відстані від вихідної напруги інфрачервоного датчика Measured у графічному індикаторі вікна Sensor Readings та її лінійна апроксимація Curve Fitting (на рис. 4 позначка 3 та рис. 5).

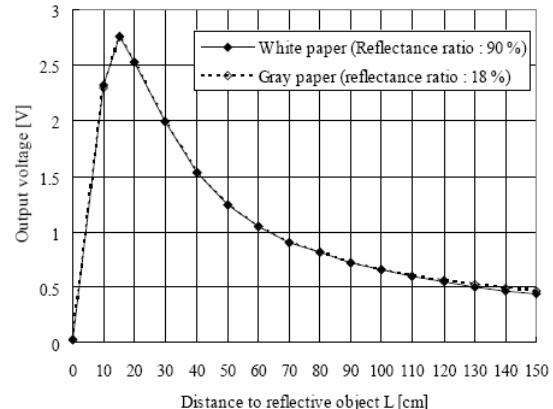


Рис. 3. Графік залежності напруги від відстані IR вимірювача SHARP

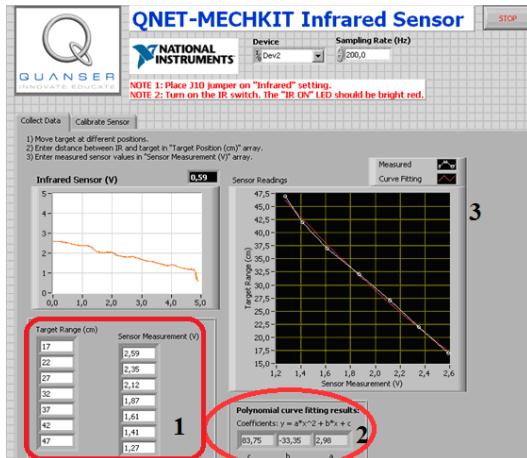


Рис. 4. Робочий екран VI QNET MECHKIT Infrared Sensor з результатами вимірювань датчика

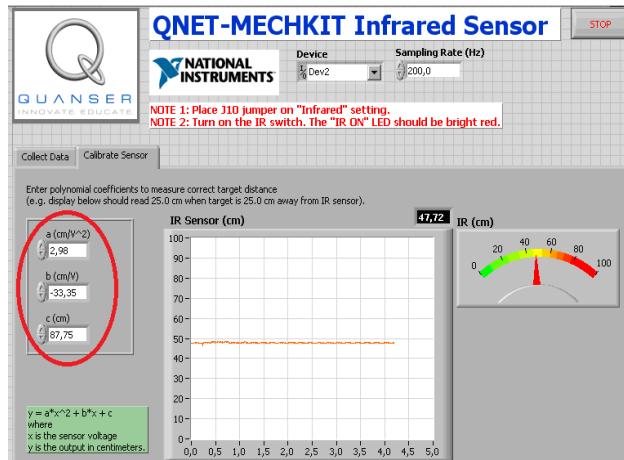


Рис. 6. Вікно калібрування інфрачервоного датчика

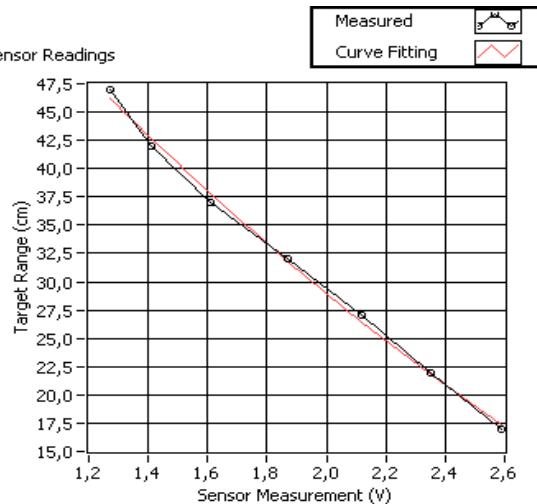


Рис.5. Результати вимірювань інфрачервоного датчика

Для збільшення точності вимірювання відстані було виконано калібрування датчика, підключеної до вимірювальної системи.

Оскільки характеристика інфрачервоного датчика має квадратичну залежність $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$, то отримані значення коефіцієнтів полінома другого порядку: a (швидкість зміни нахилу апроксимуючої кривої), b (нахил апроксимуючої кривої) та c (зсув апроксимуючої кривої) (рис. 4 виділено колом 2), переносяться на закладку Calibrate Sensor (калібрування датчика) в якості параметрів калібрування для підтвердження фактичного місця розташування об'єкта (рис. 6).

Відносна похибка δ обчислюється за формулою:

$$\delta = \frac{|a - x|}{a} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де a – дійсне значення вимірюваної величини (відстань від об'єкта до світлодіода IR LED);

x – результат вимірювання відстані.

На рисунку 6 стрілочний індикатор відстані до об'єкту IR (cm) відображає відстань до об'єкта за експериментом $a = 47$ см, а індикатор відстані до об'єкту IR Sensor (cm) показує значення $x = 47,72$ см, обчисленого за коефіцієнтами полінома другого порядку a , b та c (рис. 6 виділено колом).

За результатами експерименту відносна похибка дорівнює

$$\delta = \frac{|47 - 47,72|}{47} \cdot 100\% = 1,53\%.$$

Таким чином, у лабораторній роботі експериментальним шляхом визначений робочий діапазон інфрачервоного датчика $17 \div 47$ см. Підтверджено, що коли відстань до об'єкта змінюється від 0 до 17 см, вихідна напруга збільшується, при перевищенні відстані 17 см напруга зменшується, оскільки графік IR вимірювача (рис. 3) змінюється за нелінійним законом.

Лабораторна робота «Вимірювання відстані до об'єкту за допомогою ультразвукового датчика (сонар)»

Мета роботи: виконання градуування і калібрування ультразвукового датчика (сонар) та вимірювання відстані до об'єкту на платі QNET MECHKIT.

Задачі цієї роботи включають:

– ознайомлення з принципом дії ультразвукового датчика. Сенсори цього типу використовуються в якості датчиків наближення для дистанційного виявлення різних об'єктів і вимірювання відстані [7];

– підготовку до проведення експерименту на макетній платі QNET Mechatronics Sensors модуля MECHKIT: наявність джамперу J9 в положенні «Sonar» (сонар); включення живлення установки NI ELVIS-II, відкриття програми VI QNET_MECHKIT_Sonar.vi [4];

– виконання лабораторної роботи та визначення робочого діапазону вимірювання датчика [5].

На рисунку 7 показаний зовнішній вигляд сонару, який складається з двох мембрани, одна з яких генерує звук, а інша реєструє відображене відлуння. Звуковий генератор створює короткий, з деяким періодом ультразвуковий імпульс і запускає внутрішній таймер. Друга мембра реєструє прибуття відбитого імпульсу і зупиняє таймер. Проміжок часу від моменту випромінювання до моменту прийому сигналу відбиття, поділений на 2 ($t/2$) використовується для обчислення відстані до об'єкта d (рис. 8). Щоб знайти відстань треба знати швидкість звукової хвилі. Повний контроль над робочим процесом забезпечує мікропроцесор.



Рис. 7. Зовнішній вигляд сонару

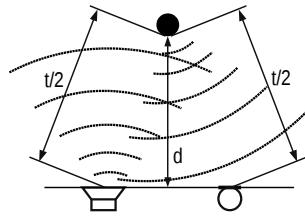


Рис. 8. Принцип дії ультразвукового датчика відстані

В лабораторній роботі об'єктом дослідження був щільний шматок картону, розміром 10×10 см білого кольору, який добре відбиває випромінювання.

Об'єкт пересувався повільно від сонару до потрапляння у робочий діапазон датчика.

Значення відстані між об'єктом і сонаром записувалися до масиву даних в дюймах Target range (in), а відповідне вимірюване значення напруги на виході датчика – до масиву Sensor measurement (V) (на рис. 9 виділено колом 1). Було виконано 7 вимірювань положення об'єкта в діапазоні від 20 см до 43 см (1 дюйм (in) = 2,54 см).

За результатами дослідження побудована залежність відстані від вихідної напруги сонару Measured у графічному індикаторі вікна Sensor Readings та її лінійна апроксимація Curve Fitting (на рис. 9 позначка 3 та рис. 10). Сонар на відміну від інфрачервоного сенсора має лінійну характеристику $y = a \cdot x + b$, де a – коефіцієнт нахилу «slope» (дюйм/V), а b – коефіцієнт зсуву «intercept» (дюйм) (рис. 9 виділено колом 2).

Для збільшення точності вимірювання відстані було виконано калібрування датчика, підключенного до вимірювальної системи.

Отримані значення коефіцієнта зсуву «intercept» (дюйм) і нахилу «slope» (дюйм/V), переносяться на за-кладку Calibrate Sensor (калібрування датчика) в якості параметрів калібрування «Gain (in/V)» (калібруваль-

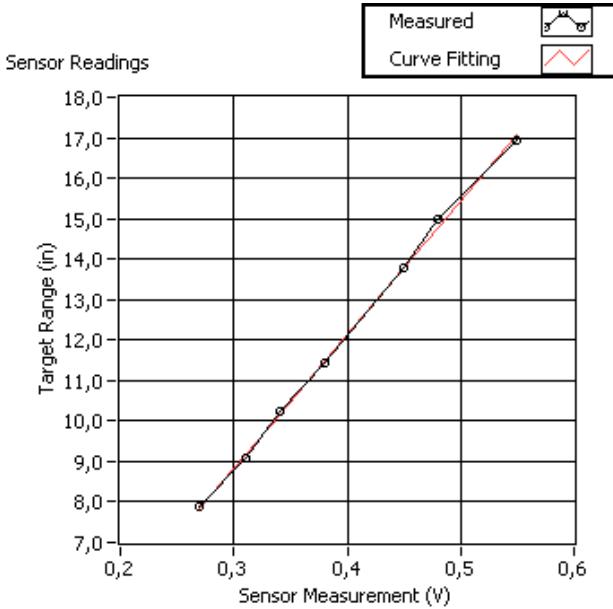


Рис. 10. Результати вимірювань сонару

ний коефіцієнт перетворення датчика) та «Offset (in)» (калібрувальне зміщення нуля датчика) для підтвердження фактичного місця розташування об'єкта (рис. 11).

На рис. 11 стрілочний індикатор відстані до об'єкту Sonar (in) 2 відображає відстань до об'єкта за експериментом $a = 10,23$ дюймів, а індикатор відстані до об'єкту Sonar (in) показує значення $x = 10,21$ дюймів, обчислена на основі параметрів «Gain» і «Offset» (на рис. 10 виділено колом).

Відносна похибка δ обчислюється за формулою (1). За результатами експерименту вона має значення

$$\delta = \frac{|10,23 - 10,21|}{10,23} \cdot 100\% = 0,2\%.$$

При виконанні лабораторної роботи виявлено, що датчик реагує на найближчий об'єкт, який потрапляє в зону його випромінювання. Робочий діапазон вимірювання $20 \div 43$ см.

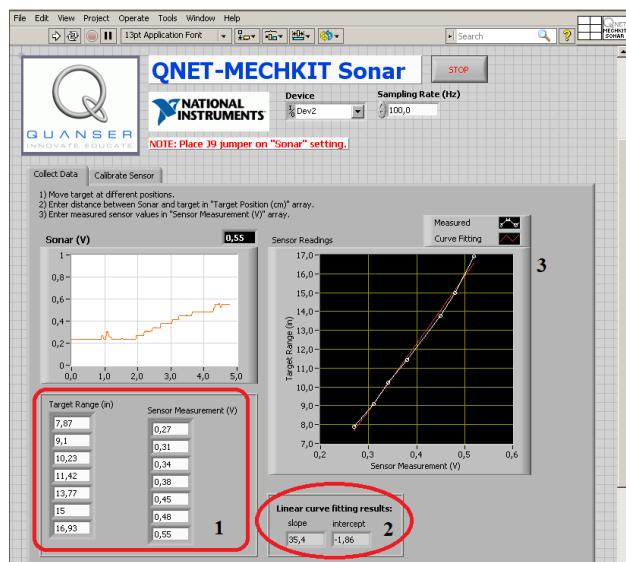


Рис. 9. Робочий екран VI QNET MECHKIT Sonar з результатами вимірювань датчика

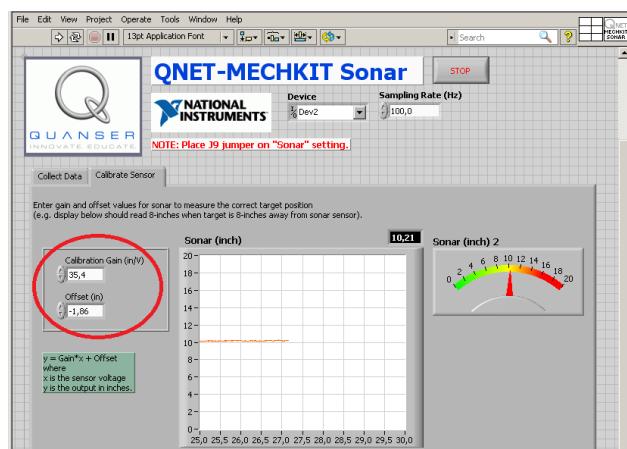


Рис. 11. Вікно калібрування ультразвукового датчика

Висновки. В статті розглянуті послідовність та результати виконання двох лабораторних робіт з курсу «Основи мехатроніки» по дослідженю властивостей локаційних сенсорів. Представлені результати дослідження інфрачервоного та ультразвукового датчиків. Обладнання лабораторії створює умови для самостійної роботи студентів в навчальному процесі та мотиває їх до аналізу отриманих результатів досліджень.

Список літератури

1. Асмолова Л. В., Аніщенко М. В., Лобода К. Ю. Датчики вимірювання кутового положення вала на базі обладнання National Instruments з платою QNET-MECHKIT «Датчики для мехатроніки» // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». Харків: НТУ «ХПІ», 2019, № 9 (1334). С. 73 - 76. doi: 10.20998/2079-8024.2019.9.14.
2. Конюх В. Л. Основы робототехники. Ростов н/Д: Феникс, 2008. 281 с.
3. Инфракрасный датчик расстояния. URL: http://home.roboticlab.eu/ru/examples/sensor/ir_distance (дата обращения 28.01.2020).
4. Инженерный тренажёр Quanser для NI-ELVIS. Руководство пользователя QNET. URL: <http://nitec.nstu.ru/upload/lib/QNET%20User%20Manual.pdf>. (дата обращения 28.01.2020).
5. Инженерный тренажёр Quanser для NI-ELVIS. Тренажёр QNET Мехатронные датчики. URL: <http://nitec.nstu.ru/upload/lib/QNET%20MECHKIT%20Laboratory%20-%20Instructor%20Manual.pdf>. (дата обращения 28.01.2020).
6. IR датчик расстояния SHARP 2Y0A02. URL: https://makerobot.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=167. (дата обращения 28.01.2020).
7. Ультразвуковой датчик расстояния. URL: http://home.roboticlab.eu/ru/examples/sensor/ultrasonic_distance. (дата обращения 29.01.2020).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Асмолова Лариса Валеріївна (Асмолова Лариса Валеріевна, Asmolova Larysa Valeriivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0208-2380>; e-mail: asmolova_larisa@ukr.net.

Аніщенко Микола Васильович (Анищенко Николай Васильевич, Anishchenko Mykola Vasylovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: annikolay@ukr.net.

References (transliterated)

1. Asmolova L. V., Anishchenko M. V., Loboda K. Yu. Datchyky vymiriuvannia kutovoho polozhennia vala na bazi obladnannia National Instruments z platoiu QNET-MECHKIT «Datchyky dla mechatroniki» [Sensors of measurement of shaft rotation angle on the basis of equipment National instruments on the board QNET-mechkit «Sensors for mechatronics»] // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut». Seria «Problemy avtomatyzovanoho elektroprivyoda. Teoriia i praktika» [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2019, № 9 (1334). pp. 73 - 76. doi: 10.20998/2079-8024.2019.9.14.
2. Konyuh V. L. Osnovy robototekhniki [Robotics Basics]. Rostov n/D: Feniks, 2008. 281 p.
3. Infrakrasnyj datchik rasstoyaniya [Infrared distance sensor]. URL: http://home.roboticlab.eu/ru/examples/sensor/ir_distance (accessed 28.01.2020).
4. Inzhenernyj trenazher Quanser dlya NI-ELVIS. Rukovodstvo pol'zovatelya QNET [Quanser Engineering Trainer for NI-ELVIS. QNET User Manual]. URL: <http://nitec.nstu.ru/upload/lib/QNET%20User%20Manual.pdf>. (accessed 28.01.2020).
5. Inzhenernyj trenazher Quanser dlya NI-ELVIS. Trenazher QNET Mekhatronnye datchiki [Quanser Engineering Trainer for NI-ELVIS QNET. Mechatronic Sensors Trainer]. URL: <http://nitec.nstu.ru/upload/lib/QNET%20MECHKIT%20Laboratory%20-%20Instructor%20Manual.pdf>. (accessed 28.01.2020).
6. IR datchik rasstoyaniya SHARP 2Y0A02 [SHARP 2Y0A02 Infrared Distance Sensor]. URL: https://makerobot.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=167. (accessed 28.01.2020).
7. Ul'trazvukovoj datchik rasstoyaniya. [Ultrasonic distance sensor] URL: http://home.roboticlab.eu/ru/examples/sensor/ultrasonic_distance. (accessed 29.01.2020).

Надійшла 08.02.2020

В. В. БУШЕР, О. В. ГЛАЗЄВА

ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНИХ ТА АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

Використання високовольтних перетворювачів частоти є одними з найперспективніших напрямків в розробці сучасних систем суднового електропостачання завдяки їх підвищеної надійності, економічної доцільності, підвищеної якості вихідної електроенергії, що дозволяє збільшити термін служби і якість регулювання потужних суднових електроприводів. В роботі виконано аналіз багаторівневих каскадних АІН на основі моделі в середовищі Matlab/SimPowerSystem. Дослідження електромагнітних процесів та спектрального складу вихідної напруги та струму показало, що THD як за струмом, так і за напругою становяться кращими при використанні 5-рівневої системи порівняно з 3-рівневою, що свідчить про доцільність з цього критерію збільшення кількості рівнів. Частота модуляції має великий вплив на THD за струмом і пульсації електромагнітного моменту, в зв'язку з чим її правильний вибір з урахуванням пропускного перегріву транзисторів має важливу роль при проектуванні АІН. Також для підвищення перевантажувальної спроможності за моментом та коефіцієнту використання перетворювача за потужністю доцільно до синусоїdalnoї складової додавати третю гармоніку з амплітудою 1/6 від основної. Незважаючи на незначне погрішення THD діюче значення вихідної фазної напруги зростає майже на 16 % за рахунок чого електродвигун може разгонятися швидше, що важливо для суднових агрегатів, насамперед підрядуючих пристрій. В роботі показано доцільність використання методу балансування лінійних напруг, що при пошкодженні однієї або кількох секцій забезпечує продовження функціонування АІН з максимальним використанням потужності і є найважливішою рисою каскадних АІН, особливо для живучості суден.

Ключові слова: багаторівневий високовольтний перетворювач частоти, автономний інвертор напруги, коефіцієнт несинусоїdalності, каскадний АІН, скалярна ШІМ, метод балансування лінійних напруг.

В. В. БУШЕР, О. В. ГЛАЗЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СУДОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Применение высоковольтных преобразователей частоты является одним из самых перспективных направлений в разработке современных систем судового электроснабжения благодаря их повышенной надёжности, экономической целесообразности, повышенному качеству выходной электроэнергии, что позволяет увеличить срок службы и качество регулирования мощных судовых электроприводов. В работе выполнен анализ многоуровневых каскадных АИН на основе модели в среде Matlab / SimPowerSystem. Исследование электромагнитных процессов и спектрального состава выходных напряжений и токов показало, что THD как по току, так и по напряжению становятся лучшими при использовании 5-уровневой системы по сравнению с 3-уровневой, что свидетельствует о целесообразности по этому критерию увеличения количества уровней. Частота модуляции имеет большое влияние на THD по току и пульсации электромагнитного момента, в связи с чем её правильный выбор с учётом допустимого перегрева транзисторов имеет важную роль при проектировании АИН. Также для повышения перегрузочной способности по моменту и коэффициента использования преобразователя по мощности целесообразно к синусоидальной составляющей напряжения добавлять третью гармонику с амплитудой 1/6 от основной. Несмотря на незначительное ухудшение THD, действующее значение выходного фазного напряжения возрастает почти на 16%, за счёт чего электродвигатель может разгоняться быстрее, что важно для судовых агрегатов, прежде всего для подрывающих устройств. В работе показана целесообразность использования метода балансировки линейных напряжений, что при повреждении одной или нескольких секций обеспечивает продолжение функционирования АИН с максимальным использованием мощности и является важнейшей чертой каскадных АИН, особенно значимой для живучести судов.

Ключевые слова: многоуровневый высоковольтный преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, коэффициент несинусоидальности, каскадный АИН, скалярная ШІМ, метод балансировки линейных напряжений.

V. V. BUSHER, O. V. GLAZEVA

RESEARCH OF HIGH-VOLTAGE FREQUENCY CONVERTERS IN SHIP ELECTRIC POWER SYSTEMS

The use of high-voltage frequency converters is one of the most promising areas in the development of modern marine power supply systems, due to their increased reliability, economic feasibility, improved quality of output electricity, which allows to increase the service life and quality of regulation of powerful marine electric drives. In this paper, an analysis of multilevel cascade FC based on a Matlab / SimPowerSystem model is performed. A study of electromagnetic processes and the spectrum of the output voltage and current showed that THD both in current and in voltage becomes better when using a 5-level system compared to a 3-level system, which indicates the expediency of increasing the number of levels according to this criterion. The modulation frequency has a great influence on THD in current and pulsation of the electromagnetic torque, and therefore its correct choice, taking into account the permissible overheating of transistors, has an important role in the design of FC. It is also advisable to add a third harmonic with an amplitude of 1/6 of the main to the sinusoidal component of the voltage to increase the overload capacity. Despite a slight deterioration in THD, the RMS of the output phase voltage rises by almost 16%, due to which the electric motor can accelerate faster, which is important for marine units, especially for thrusters. The paper also shows the feasibility of using the method of balancing linear stresses in case when one or several cells are damaged, ensures the continued operation of the FC with the maximum use of power and is an important feature of cascading FC, especially significant for the survivability of ships.

Keywords: multi-level high-voltage frequency converter, autonomous voltage inverter, total harmonic distortion, cascaded FC, scalar PWM, linear voltage balancing method.

Вступ. Впровадження високовольтного регульованого електроприводу в морській індустрії є одним з основних напрямків зменшення споживання електроенергії та підвищення EEDI (Energy Efficiency Design

Index – Спроектований Індекс Енергоефективності) та EEOI (Energy Efficiency Operational Index – Експлуатаційний Індекс Енергоефективності), які є одними з найголовніших параметрів при проектуванні та виготовленні сучасного судна [1].

© В .В. Бушер, О. В. Глазєва, 2020

Використання перетворювачів частоти (ПЧ) є найбільш економічним способом плавного автоматичного регулювання швидкості обертання і продуктивності електроприводу, що дозволяє більш ефективно забезпечити:

- енергозберігаючі режими, так як асинхронний двигун (АД) отримує від мережі рівно стільки енергії, скільки потрібно для оптимальної роботи з максимальним ККД;
- стабілізацію параметрів.
- надійність експлуатації агрегатів, їх ресурс при зниженні витрат на технічне обслуговування і ремонт;
- екологічність, електромагнітну сумісність та інтеграцію в АСЕУ.

Аналіз проблеми. Потужні високовольтні перетворювачі частоти (ВПЧ) застосовуються в судновий електроенергетиці головним чином в складі електроприводів підроюючих пристрій, електроруху, приводах потужних вентиляторів і насосів.

В даний час найбільшого поширення набули перетворювачі частоти для керування швидкістю обертання високовольтних двигунів за такими схемами [2]

1. ВПЧ, побудований за двохтрансформаторною схемою з низьковольтною ланкою постійного струму.

2. ВПЧ, побудований за структурою багаторівневого перетворювача з вхідним секційним трансформатором.

3. ВПЧ, побудований за структурою каскадного перетворювача із вхідним секційним трансформатором.

Огляд багаторівневих інверторів, що існують (рис. 1) дозволив виявити, що найбільш поширено використання наступних систем [3]:

- АІН з обмежуючими діодами («dioide-clamped converter») або з фіксованою нульовою точкою («neutral point clamped»);

– АІН з плаваючими або навісними конденсаторами («floating-capacitor converter»);

– каскадний АІН («cascaded H-bridge converter»).

Найбільш перспективними є АІН, що побудовано за каскадною схемою (рис. 2, 3) [4]. За цією структурою можна досягти будь-яких високих рівнів вихідної напруги, використовуючи тільки стандартні низьковольтні технологічно сформовані компоненти. Високий ступінь модульності дозволяє збільшити працевздатність без відключення навантаження навіть в разі несправності в одному або декількох з модулів.

Особливості каскадних АІН:

- висока якість вихідної напруги і струму;
- багаторівнева схема формування вихідної напруги забезпечує синусоїдальну форму вихідного струму;
- хороша електромагнітна сумісність з системою електропостачання;
- необхідність живлення кожного модулю індивідуальним джерелом постійної напруги;
- підвищена надійність роботи;
- відсутність необхідності установки вихідних фільтрів;
- потужність від сотень кіловат до десятків мегават.

Топологія і принципи управління інверторами визначаються сучасними силовими напівпровідниково-вими елементами нового типу (IGBT, GTO, IGCT, SGCT), а також різними видами широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [5,6].

Для формування напруги на виході багаторівневих АІН використовують різні алгоритми ШІМ. Найбільшого поширення набула класифікація алгоритмів управління АІН, яка заснована на наявності або відсутності високочастотного несучого сигналу порівняння:



Рис. 1. Топології багаторівневих інверторів

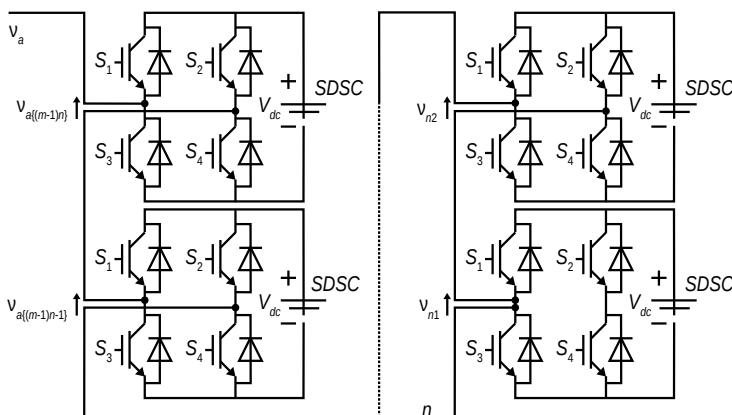
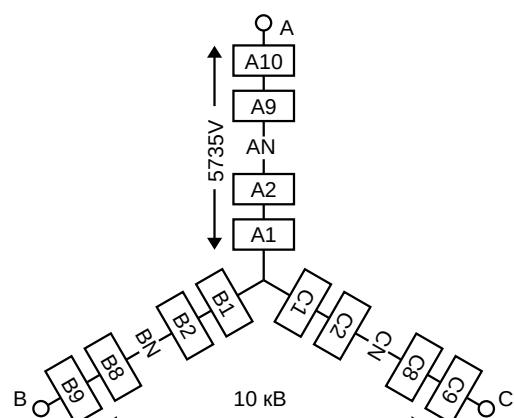


Рис. 2. Одна фаза каскадного Н-моста багаторівневого інвертора
Рис. 3. Використання низьковольтних модулів для формування напруги понад 1000 В



- синусоїdalна (скалярна) ШІМ;
- модифіковані алгоритми синусоїdalної ШІМ;
- ШІМ зі змінними параметрами;
- просторово-векторна ШІМ;
- алгоритм виключення окремих гармонік;
- вейвлет-модуляція та ін.

На практиці найбільшого поширення в силу простоти реалізації отримали алгоритми скалярної ШІМ.

Для багаторівневих ПЧ одним з найкритичніших режимів є режим роботи при виході з ладу силового модуля в однієї з фаз інвертора. Байпасування при цьому силового модуля інвертору небезпечне виникненням перекосу напруг по фазах, дисбалансом струмів в навантаженні.

АІН, побудований за каскадною схемою, має підвищено надійність порівняно з іншими топологіями побудови тому, що на випадок відмови однієї з секцій, застосовують обхідний контактор який здатний зберегти працездатність з частковою втратою потужності. При виникненні аварії цей контактор є шунтом, який виключає секцію з послідовного кола, при цьому справні секції продовжують працювати [7,8].

Простий обхід секції призводить до значного погрішення якості струмів із за виникнення несиметрії напруги живлення, а значить, погрішення умов роботи навантаження – АД. Тому в каскадних ПЧ використовують різні методи управління в аварійних режимах. Так, в ПЧ Allen Bradley HV FC 6000 після виявлення дефекту секції в однієї фазі замикаються одноіменні секції в двох інших фазах. Це призводить до втрати напруги на величину U_ϕ / n , де n – кількість секцій в одній фазі [9]. В ПЧ SIEMENS серії Robicon PERFECT HARMONY використовують метод балансування лінійних напруг [10].

Метою даної роботи є дослідження принципів формування багаторівневої вихідної напруги ВПЧ та вибір найкращого методу підвищення електромагнітної сумісності з потужним АД в нормальніх та аварійних режимах. Для реалізації зазначененої мети в роботі вирішено наступні завдання:

- проведено аналітичний огляд типових структур високовольтних перетворювачів частоти;
- побудовано моделі багаторівневих перетворювачів модульного типу;
- проведено спектральний аналіз струмів статора потужного АД при його роботі з 3-рівневим та 5-рівневим каскадними перетворювачами;
- дослідження скалярних алгоритмів формування ШІМ на виході каскадного АІН;
- розроблено алгоритм формування ШІМ п'ятирівневим АІН при пошкодженні однієї або двох секцій АІН.

Матеріали дослідження. Для побудови моделі каскадного багаторівневого ПЧ, який працює на потужний АД, використано метод математичного моделювання в середовищі Matlab (рис. 5) [11,12].

Вихідними даними для моделювання використано параметри схеми заміщення потужного АД марки ABB/AMD710X6T VABM, технічні характеристики якого наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики АД марки ABB / AMD710X6T VABM

Номінальна потужність, МВт	2,1
Напруга, В	10000
Частота, Гц	50
Частота обертання, об/хв	995
Струм, А	139
Коефіцієнт потужності	0,9
Номінальний момент, Н·м	20145
Відносний пусковий струм	6,7
Відносний пусковий момент	0,8
Відносний максимальний момент	2,5
Параметри схеми заміщення	
Опір статору R1 (120°C)	0,3047
Реактивність статору X1	5,2670
Опір ротору R2' (40°C)	0,2030
Реактивність ротору X2'	3,2926

Параметри ВПЧ:

1. Структура АІН: каскадна схема з живленням кожного Н-моста від трансформатора з розщепленою вторинною обмоткою;
2. Метод ШІМ: скалярна ШІМ та модифікована скалярна ШІМ;
3. Частота ШІМ: 1000 / 4000 Гц;
4. Число рівнів вихідної напруги: 3 і 5 відповідно для 3-рівневого і 5-рівневого перетворювачів;
5. Елементна база модулів: IGBT-транзистори з паралельно включеними діодами зворотного струму.

Блок управління (рис. 4) дозволяє в залежності від завдання реалізовувати два алгоритму формування ШІМ. Перший алгоритм – з фазовим зміщенням синусоїdalних та амплітудним зрушеним трикутних сигналів (рис. 5,а); другий – з додаванням третьої гармоніки з амплітудою 1/6 U_m в синусоїdalні сигнали фазних напруг (рис. 5,б) [13,14].

У таблиці 2 вказано THD напруги і струму в фазі АД при його роботі від 3-х і 5-рівневого АІН. Співставлено, за умови живлення від ідеальних джерел постійного струму, гармонійний склад при різних частотах комутації IGBT-транзисторів та різних методах ШІМ – синусоїdalної та синусоїdalної з додаванням третьої гармоніки.

Таблиця 2 – Порівняльні результати розрахунків

ШІМ, %	THD	Рівень ВПЧ	
		3	5
синусоїdalна	THD _I	0,99	0,55
	THD _U	35,54	21,73
з додаванням 3-ї гармоніки – 4000 Гц	THD _U	30,56	23,2
	THD _I	1,01	0,65
з додаванням 3-ї гармоніки – 1000 Гц	THD _U	30,49	23
	THD _I	5,99	5,43

Видно, що підвищення кількості рівнів у АІН призводить до покращення THD за струмом та напругою. Однак в разі 5-рівневого АІН потрібна більша кількість ізольованих джерел постійного струму, ніж в 3-рівневому, що впливає на вартість ВПЧ.

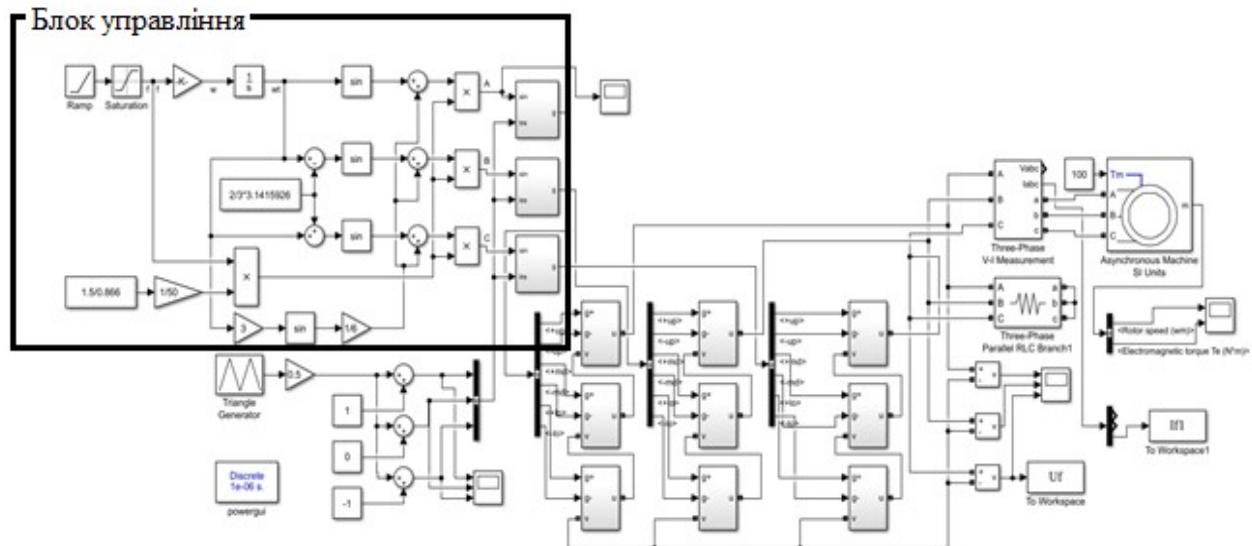


Рис. 4. Модель 3-рівневого перетворювача

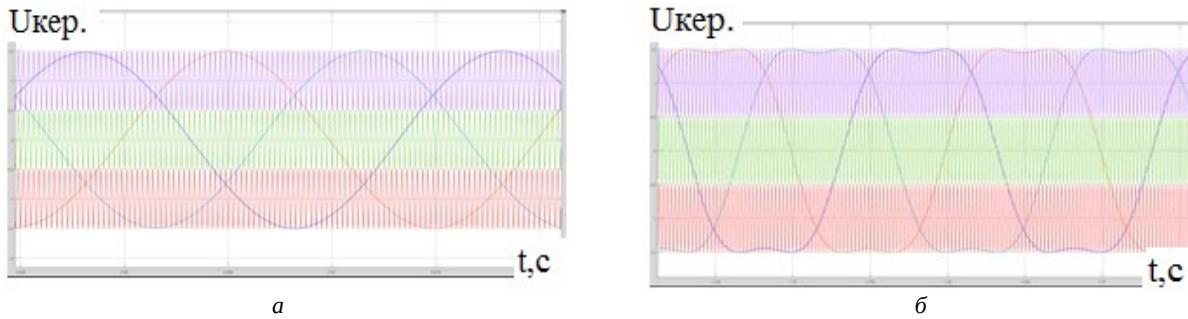
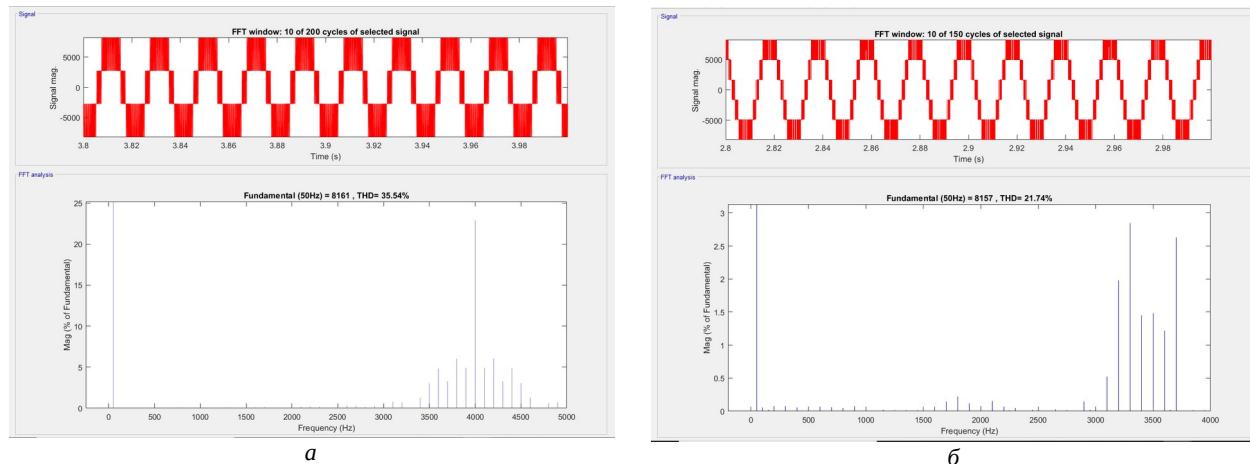
Рис. 5. Задані синусоїdalні і пилкаподібні сигнали для отримання 3-рівневого АІН:
а – при синусоїdalній ШІМ; б – ШІМ з додаванням 3-ї гармоніки

Рис. 6. Часові діаграми та спектри фазних напруг: а – на виході 3-рівневого АІН; б – на виході 5-рівневого АІН

Підвищення частоти модуляції до технічно можливого рівня значно знижує пульсації електромагнітного моменту АД (рис. 7), що позитивно впливає на його роботу [11]. Додавання третьої гармоніки призводить до зростання фазної напруги на 16 % та відповідного зростання критичного моменту АД, що робить цей метод керування досить перспективним для використання, особливо для електроприводів, що по-

требують високої швидкодії, насамперед для підрядуючих установок.

За допомогою розробленої моделі було розглянуто аварійний режим роботи 5-рівневого АІН при відмові однієї з секцій у фазі «А» (рис. 8). Алгоритм, застосований для нормалізації роботи, засновано на аналізі діаграм лінійних та фазних напруг, які створює АІН в нормальному і аварійному режимах (рис. 9).

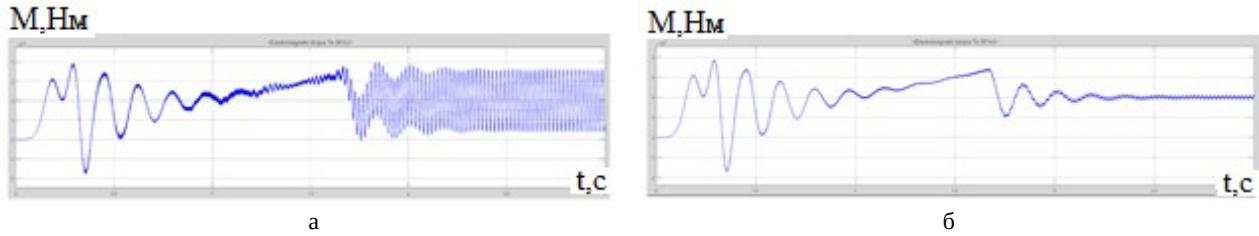


Рис. 7. Характеристика зміни електромагнітного моменту трифазного АІН з СШМ:
а – частота модуляції $f_{\text{мод}} = 1000$ Гц; б – частота модуляції $f_{\text{мод}} = 4000$ Гц

Згідно з даним методом підбір кутів зсуву між фазними напругами зміщує нейтраль та дає можливість підтримувати збалансованими лінійні напруги АІН. Для розрахунку міжфазних кутів α , β , γ в аварійному режимі необхідно забезпечити рівність всіх трьох лінійних напруг.

$$\begin{cases} U_A^2 + U_B^2 - 2U_A U_B \cos(\alpha) = U_C^2 + U_B^2 - 2U_B U_C \cos(\beta); \\ U_A^2 + U_B^2 - 2U_A U_B \cos(\alpha) = U_C^2 + U_A^2 - 2U_C U_A \cos(\gamma); \\ \alpha + \beta + \gamma = 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

де U_A , U_B , U_C – модулі напруг кожної фази;
 $\alpha = \angle(U_A, U_B)$, $\beta = \angle(U_B, U_C)$, $\gamma = \angle(U_C, U_A)$.

Якщо прийняти, що одна секція створює напругу рівну 1 в.о. (відносна одиниця), тоді усі фазні напруги будуть дорівнювати 5 в.о. (для 5-рівневого АІН), а лінійні відповідно $5 \cdot \sqrt{3} \approx 8,66$ в.о.,

$$U_A = U_B = U_C = 5 \text{ в.о.}, \\ U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 5 \cdot \sqrt{3} \approx 8,66 \text{ в.о.}$$

В аварійному режимі напруга фази А: $U_A = 4$ в.о.

Тоді, рівняння (1) перетворюється до виду:

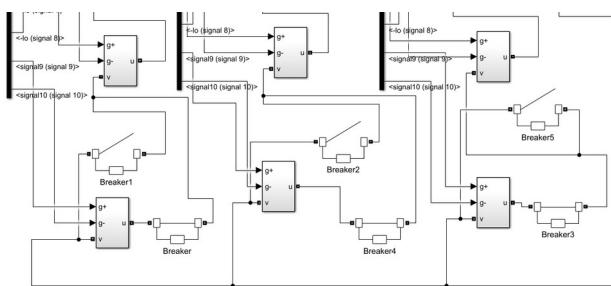


Рис. 8. Обхідні контактори секцій каскадної схеми

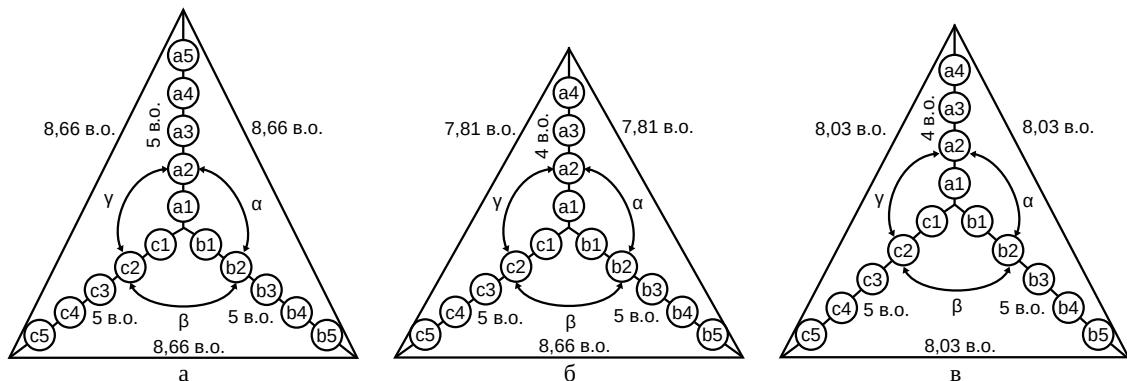


Рис. 9. Векторні діаграми 5-рівневого АІН при роботі у:
а – нормальному режимі; б – аварійному режимі; в – аварійному режимі з компенсацією

$$\begin{cases} 4^2 + 5^2 - 2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot \cos(\alpha) = 5^2 + 5^2 - 2 \cdot 5 \cdot 5 \cdot \cos(\beta) \\ 4^2 + 5^2 - 2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot \cos(\alpha) = 5^2 + 5^2 - 2 \cdot 5 \cdot 4 \cdot \cos(\gamma) \\ \alpha + \beta + \gamma = 2\pi \end{cases}$$

Рішення системи рівнянь (2) дає наступне значення кутів:

$$\alpha = \gamma = 126^\circ, \beta = 360 - 2 \cdot 126 = 108^\circ$$

З такими кутами лінійні напруги зменшуються лише на 7,27 % (рис. 9,в) на відміну від 20 % при використанні байпасування секцій в фазах В і С.

Перехідні характеристики моменту, фазних напруг та струмів при аварійному режимі (відмові однієї секції фазі А) наведено на рис. 10: двигун розганяється до номінальної частоти обертання у нормальному режимі з 0 до 2 с, у момент часу 3 с імітується відмова однієї секції, а через 2 с відбувається компенсація пошкодженої секції зсувом міжфазних кутів.

З графіків можна побачити, що при виході з ладу однієї з секцій в фазі А, в лінійних струмах та напругах виникає дисбаланс, який проявляється зміною амплітуд. При використанні модифікованого алгоритму керування, тобто зміни фазних кутів α , β , γ в системі вдалося досягти нового збалансованого стану. При зменшенні лінійних напруг на 7,27% жорсткість механічної характеристики двигуна зменшується на 14%, але АД зберігає свою працездатність (при байпасуванні жорсткість зменшується на 36%). Використовуючи закон пропорційної залежності між частотою та напругою можна відновити жорсткість механічної характеристики якщо за умовами технологічного процесу припустимо зменшення частоти на 7,27%. Таким чином, використання багаторівневого каскадного АІН здатне не тільки забезпечити високу якість напруги живлення АД, а й підвищити надійність системи.

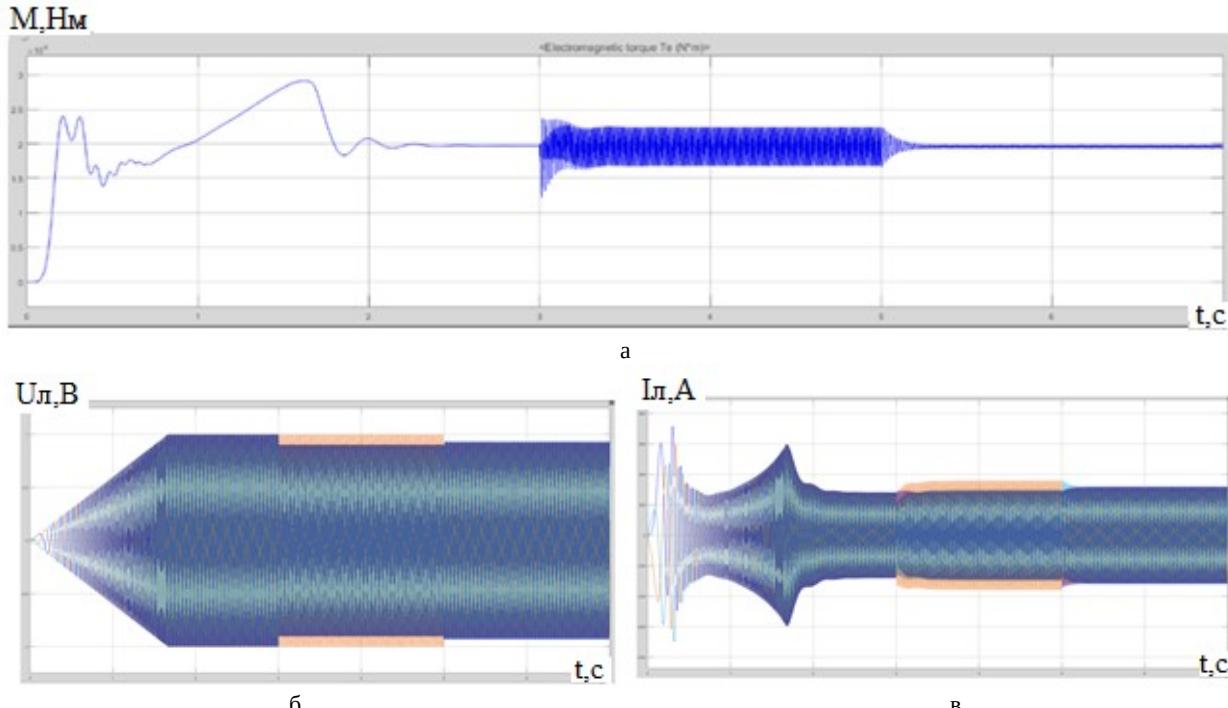


Рис. 10. Графіки на виході АІН в аварійному режимі: а – електромагнітного моменту АД; б – лінійних напруг; в – струмів

Висновки. За допомогою розробленої моделі виконано дослідження електромагнітних процесів та спектрального складу вихідної напруги та струму в багаторівневих АІН, проведено аналіз енергетичних характеристик при роботі на потужний АД. Показано, що THD як за струмом так і за напругою становуть кращими при використанні 5-рівневої системи порівняно з 3-рівневою, що свідчить про доцільність з цього критерію збільшення кількості рівнів.

THD при використанні ШІМ з додаванням третьої гармоніки стає гіршим як для 3-рівневої так і для 5-рівневої системи, але замість цього зростає діюче значення вихідної фазної напруги майже на 16 %, відповідно зростає і критичний момент АД, за рахунок чого електродвигун може розігнатися швидше, що робить даний метод керування досить перспективним для використання.

Частота модуляції має великий вплив на THD за струмом, в зв'язку з чим її правильний розрахунок має важливу роль при проектуванні АІН.

Кожних з цих параметрів тим чи іншим способом впливає на THD_I та THD_U які є головними критеріями оцінки якості електроенергії що впливають на підвищення EEDI та EEIO. Також, використання багаторівневого АІН з методом балансування лінійних напруг підвищує надійність електроприводу та живучість суднових електроенергетичних систем.

Список літератури

- Глазова О.В., Власов В.Б. Применение высоковольтных преобразователей частоты как метод повышения индекса энергоэффективности на объектах морской индустрии. Суднова электроинженерия, электроника і автоматика: Матеріали наук-метод. конф. 05 – 06 грудня 2018. Одеса: НУ «ОМА», 2018. С. 70 – 78.
- Кузькин В.И., Мелешкин В.Н., Мясищев С.В., Симоненков Д.В., Шипаева С.Н. Высоковольтный преобразователь частоты для питания асинхронных двигателей. Электротехника. Москва: Акционерное общество «Фирма Знак». 2004, №10. С. 19 – 24.
- Бурдасов Б.К., Несторов С.А., Федотов Ю.Б. Преобразователи частоты для высоковольтных электроприводов переменного тока. APRIORI. Сер.: Естественные и технические науки: электрон. науч. журн. Краснодар: Индивидуальный предприниматель Акелян Нарине Самадовна. 2015, №4. 9 с. <http://apriori-journal.ru> (дата обращения 15.10.2020).
- Malinowski M., Gopakumar K., Rodriguez J., Perez M. A. Survey on Cascaded Multilevel Inverters. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 2010, Vol. 57, N7. pp. 2197 – 2206.
- McGrath B.P. Holmes D.G. Multicarrier PWM Strategies for Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002. Vol. 49, N4. pp.858 – 867.
- Holmes D.G., Lipo T.A. *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 744 p.
- Высоковольтный преобразователь частоты HYUNDAI серии N5000. URL: <https://kamelectro.com/catalogue/special-places/preobrazovateli-chastoty/hyundai/n5000/>. (дата обращения 05.01.2020)
- Преобразователи частоты 6-10 кВт VEDADRIVE 315–25000 кВА. URL: <http://www.aksprom.biz/Catalog/Danfoss/35589/> Preobrazovateli-chastoty-6-10-kVt-VEDADRIVE-315-25000-kVA. (дата обращения 10.01.2020).
- PowerFlex 6000 Medium Voltage Variable Frequency Drive Firmware, Parameters, and Troubleshooting Manual: Catalog Number 6000G. URL: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/6000-td004_en-p.pdf. (дата обращения 10.01.2020).
- Высоковольтные преобразователи частоты Robicon PERFECT HARMONY 225кВт – 120МВт. URL: https://driveka.ru/upload/iblock/b7b5/perfect_harmony_ru_2008.pdf. (дата обращения 11.01.2020).
- Бушер В.В., Глазова О.В., Морозов К.О., Космас Здрозис. Дослідження високовольтних перетворювачів частоти в суднових електроенергетичних системах. Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика: Матеріали наук-метод. конф. 05 – 06 листопада 2019. Одеса: НУ «ОМА», 2020. С. 231 – 237.
- Krishnapriya S., Unnikrishnan L. Multilevel Inverter Fed Induction Motor Drives. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 04, Issue 09. pp. 60 – 64.

13. Колпаков А., Карташев Е. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями. *Силовая электроника*. Санкт-Петербург: «ЗАО Медиа Группа Файнстрит». 2009, № 2. С. 57–65
14. Manimala V., Geetha N., Renuga P. Design and simulation of five level cascaded inverter using multilevel sinusoidal pulse width modulation strategies. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*. Kanyakumari, India, 2011. pp. 280 – 283.
8. *Preobrazovateli chastoty 6-10 kVt VEDADRIVE 315–25000 kVA* [Frequency inverters 6-10 kW VEDADRIVE 315-25000 kVA]. URL: <http://www.aksprom.biz/Catalog/Danfoss/35589/Preobrazova-teli-chastoty-6-10-kVt-VEDADRIVE-315-25000-kVA>. (accessed 10.01.2020).
9. *PowerFlex 6000 Medium Voltage Variable Frequency Drive Firmware, Parameters, and Troubleshooting Manual: Catalog Number 6000G*. URL: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/6000-td004_en-p.pdf. (accessed 10.01.2020).
10. *Vysokovol'tnye preobrazovateli chastoty Robicon PERFECT HARMONY 225kVt – 120MW* [High voltage frequency converters Robicon PERFECT HARMONY 225kW - 120MW]. URL: https://driveka.ru/upload/iblock/7b5/perfect_harmony_ru_2008.pdf. (accessed 11.01.2020).
11. Busher V.V., Glazeva O.V., Morozov K.O., Kosmas Zdrozis. Doslidzhennya visokovol'tnih peretvoryuvachiv chastoti v sudnovih elektroenergetichnih sistemah [Research of high-voltage frequency converters in ship electric power systems]. *Sudnova elektroinzheneriya, elektronika i avtomatyka: Materialy nauk-metod. konf. 05 – 06 lystopada 2019 r.*, Odesa [Marine Engineering, Electronics and Automation: Materials of the Scientific and Methodological Conference 05-06 December 2018]. Odesa: NU «OMA», 2019. pp. 70 – 78.
12. Krishnapriya S., Unnikrishnan L. Multilevel Inverter Fed Induction Motor Drives. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 04, Issue 09. pp. 60 – 64.
13. Kolpakov A., Kartashev E. Algoritmy upravleniya mnogourovnevymi preobrazovatelyami [Multilevel Converter Control Algorithms]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. Sankt-Peterburg: «ZAO Media Gruppa Fajnstrit». 2009, № 2. S. 57–65
14. Manimala V., Geetha N., Renuga P. Design and simulation of five level cascaded inverter using multilevel sinusoidal pulse width modulation strategies. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*. Kanyakumari, India, 2011. pp. 280 – 283.

Надійшла 10.02.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бушер Віктор Володимирович (Бушер Віктор Владими́рович, Victor Busher) – доктор технічних наук, Національний університет «Одеська морська академія», професор кафедри суднової електромеханіки і електротехніки; м. Одеса, Україна; e-mail: victor.v.bousher@gmail.com

Глазєва Оксана Володимирівна (Глазєва Оксана Владими́ровна, Oksana Glazeva) – кандидат технічних наук, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри суднової електромеханіки і електротехніки; м. Одеса, Україна; e-mail: o.glazeva@gmail.com

A. V. СЕМИКОВ**ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОФАЗНОГО ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ДВУМЯ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ**

Рассмотрена схема одновременного питания машины постоянного тока от двух накопителей электроэнергии (аккумуляторной и суперконденсаторной батареи) с многофазным широтно-импульсным преобразователем. Показано, что при таком решении требуется меньше ёмкость суперконденсаторной батареи в сравнении со схемами с разделительным диодом между накопителями или с переключением между ними. Выполнено моделирование работы электропривода на модели, учитывающей дискретизацию по времени и по уровню в системе управления и широтно-импульсную модуляцию силовых ключей. Получены временные диаграммы результатов моделирования для различного распределения тока якоря между накопителями. Показана возможность использования энергии суперконденсаторной батареи на всём интервале разгона для уменьшения потерь в аккумуляторной батарее, обладающей в несколько раз большим внутренним сопротивлением по сравнению с суперконденсаторной батареей, а также возможность при рекуперативном торможении направлять часть энергии в аккумуляторную батарею, чтобы при торможениях на продолжительных спусках обеспечивать рекуперацию энергии по значению превышающую допустимую для накопления в суперконденсаторной батарее. Полученные временные диаграммы подтвердили адекватность компьютерной модели и стабильность работы тягового электропривода при одновременном питании от двух накопителей электроэнергии. Указано на преимущество данной схемы обеспечивать уменьшение пульсаций тока якоря и накопителей, вызванных широтно-импульсной модуляцией, что уменьшает потери в них и минимально необходимое значение ёмкостей конденсаторов в широтно-импульсном преобразователе.

Ключевые слова: электромобиль, электропривод, многофазный широтно-импульсный преобразователь, суперконденсаторы, двойной накопитель электроэнергии.

O. V. СЕМИКОВ**ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОФАЗНОГО ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ДВОМА НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЯГОВОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

Розглянуто схему одночасного живлення машини постійного струму від двох накопичувачів електроенергії (акумуляторної і суперконденсаторної батареї) з багатофазним широтно-імпульсним перетворювачем. Показано, що при такому рішенні потрібно менша ємність суперконденсаторної батареї в порівнянні зі схемами з розділяючим діодом між накопичувачами або з перемиканням між ними. Виконано моделювання роботи електроприводу на моделі, що враховує дискретизацію за часом і за рівнем в системі керування і широтно-імпульсну модуляцію силових ключів. Отримано часові діаграми результатів моделювання для різного розподілу струму якоря між накопичувачами. Показана можливість використання енергії суперконденсаторної батареї на всьому інтервалі розгону для зменшення втрат в акумуляторній батареї, яка має в кілька разів більший внутрішній опір у порівнянні з суперконденсаторною батареєю, а також можливість при рекуперативному гальмуванні направляти частину енергії в акумуляторну батарею, щоб при гальмуваннях на тривалих спусках забезпечувати рекуперацію енергії, що за значенням перевищує допустиму для накопичення в суперконденсаторній батареї. Отримані часові діаграми підтвердили адекватність комп'ютерної моделі і стабільність роботи тягового електроприводу при одночасному живлення від двох накопичувачів електроенергії. Зазначено на перевага даної схеми забезпечувати зменшення пульсаций струму якоря і накопичувачів, викликаних широтно-імпульсною модуляцією, що зменшує втрати в них і мінімально необхідне значення ємностей конденсаторів в широтно-імпульсному перетворювачі.

Ключові слова: електромобіль, електропривод, багатофазних широтно-імпульсний перетворювач, суперконденсатори, подвійний накопичувач електроенергії.

O. V. SEMIKOV**THE USING OF A MULTIPHASE PULSE-WIDTH CONVERTER WITH TWO ELECTRIC ENERGY STORAGE AT A TRACTION ELECTRIC DRIVE OF AN ELECTRIC VEHICLE**

The scheme of simultaneous power supply of a DC machine from two energy storage devices (accumulator and supercapacitor batteries) with a multi-phase pulse-width converter is considered. It is shown that with such a solution, less capacity of the supercapacitor battery is required in comparison with circuits with an isolation diode between drives or with switching between them. The operation of the electric drive is modeled on a model that takes into account time and level sampling in the control system and pulse-width modulation of power switches. Timing diagrams of simulation results for various distribution of the armature current between drives are obtained. The possibility of using the energy of a supercapacitor battery over the entire acceleration interval to reduce losses in a battery with several times greater internal resistance compared to a supercapacitor battery is shown, as well as the ability to direct part of the energy to the battery during regenerative braking so that it can provide during braking on long descents energy recovery exceeds the value allowed for storage in a supercapacitor battery. The obtained time diagrams confirmed the adequacy of the computer model and the stability of the traction electric drive while simultaneously powered by two electric drives. The advantage of this circuit is indicated to ensure a decrease in the ripple current of the armature and storages caused by pulse-width modulation, which reduces the loss in them and the minimum required value of the capacitance of the capacitors in the pulse-width converter.

Keywords: electric vehicle, electric drive, multi-phase pulse-width converter, supercapacitors, dual electric energy storage.

Введение. В настоящее время некоторые страны Европы определили сроки запрета на продажу бензиновых и дизельных автомобилей после 2025...40 г. [1], а в Украине отмечается один из наибольших темпов увеличения числа электромобилей в Европе [2]. На кафедре «АЭМС» НТУ «ХПИ» в 2011 была открыта новая специализация «Компьютеризированные системы электромобилей» и на базе автомобиля Ланос создан

энергии в суперконденсаторную батарею (СКБ) [3], со схемой объединения накопителей показанной на рисунке 1в. Сравнение работы такого ЭП с работой ЭП по схеме, обеспечивающей переключение между накопителями (рисунок 1б) выполнено в различных стандартных режимах движения городского цикла [4].

В данной работе рассматривается питание машины постоянного тока (М) одновременно от обоих на-

© А. В. Семиков, 2020

льского преобразователя (ШИП) [5], как показано на рисунке 2.

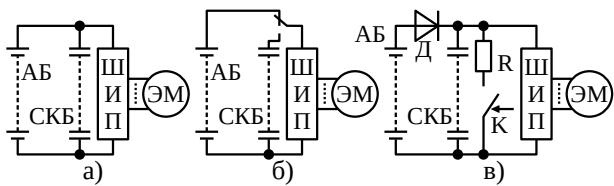
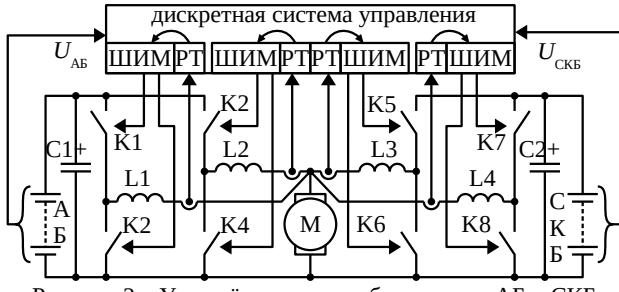


Рисунок 1 – Рассмотренные схемы объединения АБ и СКБ в ЭП электромобиля



Целью работы является проверка стабильности работы ЭП по такой схеме, возможности повышения энергоэффективности, обеспечения рекуперативных торможений при продолжительных спусках и улучшения массогабаритных показателей по сравнению со схемами ранее рассмотренными в [4].

В работе [6] предложен расчёт накапливаемой в тормозных режимах в СКБ энергии $W_{СКБ}$. При этом электрическая ёмкость $C_{СКБ}$ определяется максимальным диапазоном изменения напряжения, увеличение которого уменьшает необходимую ёмкость СКБ. При параллельном соединении АБ и СКБ (рисунок 1а) диапазон напряжения зависит от изменения напряжения АБ при изменении протекающего через неё тока. Для схем с переключателями (рисунок 1б) и с диодами (рисунок 1в) максимальное напряжение определяется допустимым импульсным напряжением. Минимальное напряжение для схемы с переключателями определяется необходимым для работы электродвигателя (ЭД) вnomинальном режиме. А для схемы с диодом оно зависит от наибольшего возможного напряжения АБ, которое в $1,2 \div 1,3$ раза больше её минимального напряжения, которое также должно обеспечивать работу ЭД вnomинальном режиме. В результате наибольший диапазон напряжения СКБ в схеме с переключателями (рисунок 1б) среди рассмотренных, следовательно для этой же схемы требуется наименьшая ёмкость СКБ. В схеме с питанием ЭД одновременно от АБ и СКБ (рисунок 2) диапазон напряжений такой же, как в схеме с переключателями, соответственно также требуется наименьшая ёмкость СКБ.

В рассматриваемом 4-фазном ШИП частота и, соответственно, период коммутации силовых ключей в каждой фазе одинаковый, но сдвиг между интервалами открытого состояния транзисторов составляет $\frac{1}{4}$ периода [5], соответственно используется общая система управления для синхронизации фаз. Это позво-

ляет увеличить частоту коммутации напряжения на якоре и уменьшить пульсации его тока. При коммутации ключей ШИП ток источника питания протекает импульсами при открытии K1, K3, K5 или K7. Соответственно, его среднеквадратичное значение, определяющее потери на сопротивлении в источнике, влияющие на его нагрев и износ, в несколько раз больше среднего значения тока, определяющего полезную мощность. Уменьшение пульсаций этого тока является одной из причин установки в ШИП конденсаторов параллельно источникам питания, на рисунке 2: C1 для АБ и C2 для СКБ. При использовании нескольких фаз амплитуда импульсов изменяется обратно пропорционально числу фаз при задании одинакового тока в каждой фазе, а частота увеличивается пропорционально числу фаз, в результате требуемая ёмкость C1 и C2 изменяется обратно пропорционально квадрату числа фаз при заданной амплитуде пульсаций.

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) силовыми ключами (K1…K8) осуществляется в соответствии с сигналами от независимых регуляторов тока (РТ) в каждой фазе. РТ выбран пропорционально интегральными с целью компенсации постоянной времени якорной цепи, предполагая незначительное изменения напряжение питания при переходных процессах в контуре тока. Но при продолжительном заряде и разряде АБ и СКБ с учётом просадки напряжения на них меняется в $1,4 \div 2$ раза, соответственно система управления изменяет коэффициент РТ обратно пропорционально этим напряжениям для постоянства коэффициентов передаточной функции контура тока независимо от уровня заряда АБ и СКБ, поэтому введены обратные связи (ОС) по напряжениям АБ U_{AB} и СКБ $U_{СKB}$. Эти ОС также используются для ограничения зарядного тока СКБ, предотвращающего её перезаряд больше допустимого значения в продолжительных рекуперативных торможениях, и для ограничения разрядного тока АБ, предотвращающего её переразряд в двигательном режиме.

Проверка стабильности работы рассматриваемого ЭП выполнена путём моделирования синтезированной компьютерной модели, учитывающей ШИМ силовых ключей и дискретизацию по уровню и по времени сигналов ОС и в РТ. Для моделирования заданы параметры автомобиля Ланос; двигателя ME1002 [7] мощностью 26 кВт, номинальными напряжением 144 В и током 205 А, рассчитанного на использование без коробки передач [8]; литий-ионной АБ ёмкостью 22 кВт·ч с номинальным напряжением 172 В и внутренним сопротивлением 0,09 Ом, рассчитанной на дальность проезда до 150 км на одном заряде [4]; СКБ ёмкостью 12 Ф с максимальным напряжением 270 В и внутренним сопротивлением 0,02 Ом, рассчитанной на приём всей энергии при торможении с 90 км/ч без уклона [5], состоящей из 100 последовательно соединённых элементов по 1200 Ф [9]. Задана частота коммутации ключей в каждой фазе равная 10 кГц, при которой проверена работа ШИП на созданном ЭП электромобиля [3].

Для двигательного режима выполнено моделирование при среднем уровне заряда АБ и СКБ при зада-

нии максимального тока якоря 500 А, причём ток фаз АБ задан в 2 раза больше тока СКБ, чтобы обеспечить использование запаса её энергии на всём интервале работы. Соответствующие временные диаграммы токов якоря $I_{\text{я}}$, АБ I_{AB} , СКБ $I_{\text{СКБ}}$ и фаз $I_{\phi,1 \text{ AB}}$, $I_{\phi,2 \text{ AB}}$, $I_{\phi,1 \text{ СКБ}}$, $I_{\phi,2 \text{ СКБ}}$ и напряжений якоря $U_{\text{я}}$, АБ U_{AB} и СКБ $U_{\text{СКБ}}$ показаны на рисунке 3. Проанализируем временные диаграммы с точки зрения их соответствия физике протекающих процессов для установления адекватности результатов компьютерного моделирования. При замыкании ключа К1 в интервале времени 36...64 мкс (и последующих с шагом периода коммутации 100 мкс) видно, что ток фазы $I_{\phi,1 \text{ AB}}$ растёт и равен протекающему в источнике с конденсатором С1 I_{CAB} , а при открытии транзистора К3 в интервале 86...114 мкс (и последующие с шагом 0,1 мс) видно, что ток фазы $I_{\phi,2 \text{ AB}}$ также растёт и равен протекающему в источнике с конденсатором С1 I_{CAB} , при этом в промежуточные интервалы времени ток фаз уменьшается, а накопителя равен нулю, так как открыты транзисторы К2 и К4.

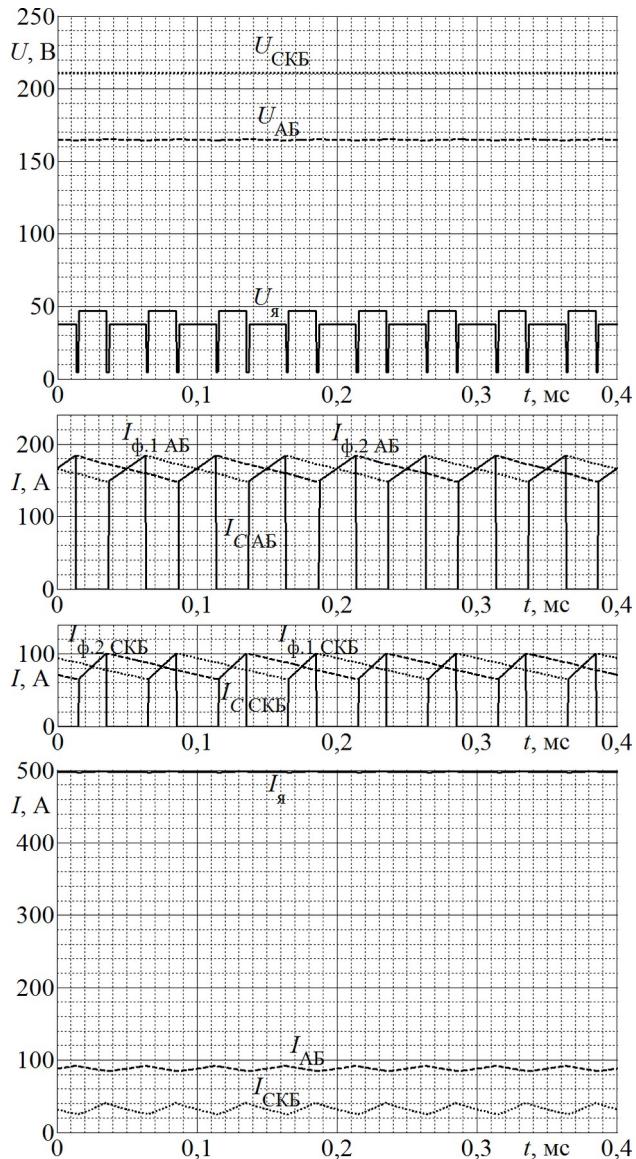


Рисунок 3 – токи и напряжения накопителей, фаз и якоря МПТ в двигательном режиме

Таким же образом токи фаз СКБ $I_{\phi,1 \text{ СКБ}}$ и $I_{\phi,2 \text{ СКБ}}$ отбираются по очереди от конденсатора С2 при открытии транзисторов К5 (15...35 мкс) и К7 (65...85 мкс) с соответствующим ростом токов, а в интервалы открытия К6 и К8 токи фаз уменьшаются, протекая через эти транзисторы. При этом время подачи напряжения от АБ больше, чем от СКБ, так как на ней напряжение больше, а выходное среднее за период напряжение каждой фазы одинаково при работе на одну нагрузку – якорь МПТ. В данном эксперименте подаваемое на якорь напряжение принимает 3 значения в разные интервалы: наименьшие 5 В при одновременном открытии ключей К2, К4, К6 и К8 (когда напряжение определяется током якоря и сопротивлением фаз и ключей ШИП), 39 В при питании от АБ через транзистор К1 или К3, что определяется четвертью напряжения АБ с учётом падений напряжения на проводниках, и 48 В при питании от СКБ через транзистор К5 или К7, что определяется четвертью напряжения СКБ с учётом падений напряжения на проводниках.

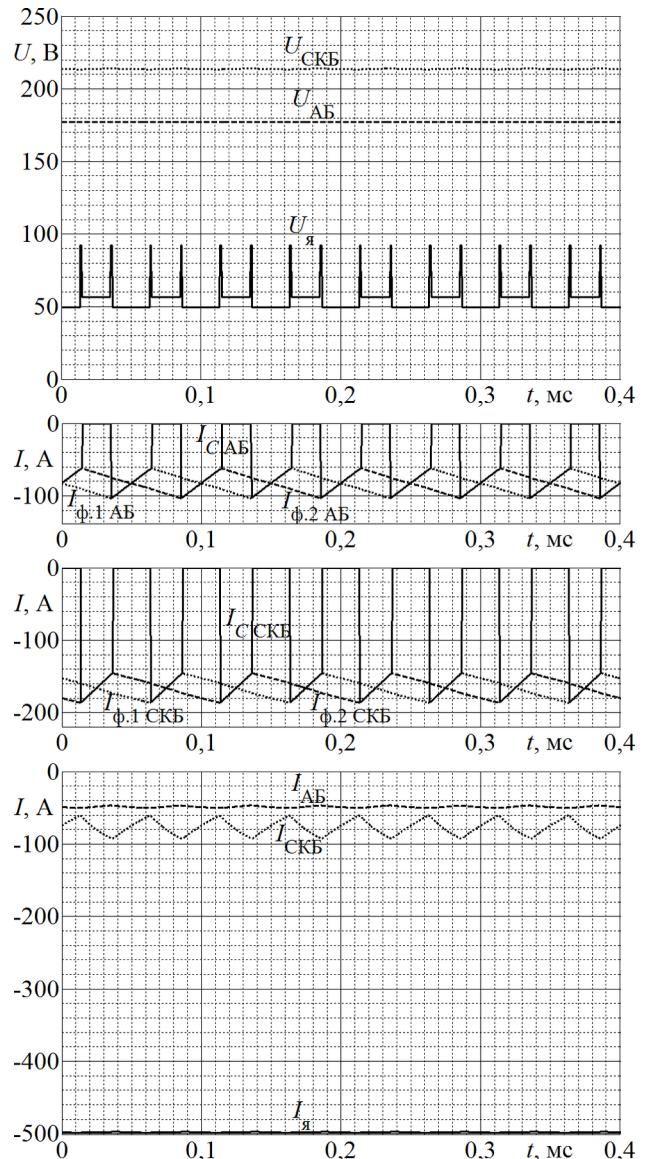


Рисунок 4 – токи и напряжения накопителей и якоря МПТ в генераторном режиме

На этой же модели промоделирован тормозной режим со средним уровнем заряда АБ и СКБ и с заданием максимального тока якоря -500 А. Соответствующие временные диаграммы токов и напряжений в цепях ЭП показаны на рисунке 4. В этом режиме токи фаз обладают положительной производной при открытии транзисторов К1, К3, К5 и К7 в интервалы времени близкие интервалам в предыдущем двигательном режиме, но при этом абсолютное значение этих токов уменьшаются, так как индуктивность фазы и якоря в этих интервалах разряжается, отдавая свою энергию накопителю, обеспечивая рекуперацию от якоря с меньшим напряжением к АБ и СКБ с большими. А при открытии транзисторов К2, К4, К6 и К8 ток увеличивается, происходит заряд этих индуктивностей от ЭДС якоря.

В обоих случаях моделирования токи фаз в пределах одного накопителя сдвинуты на половину периода (50 мкс) между собой, а токи фаз разных накопителей сдвинуты четверть периода (25 мкс). В результате частота колебаний тока якоря в 4 раза больше частоты колебаний тока каждой фазы и амплитуда более, чем в 16 (квадрат числа фаз) раз меньше амплитуды колебаний тока каждой фазы: менее 0,9 А всего тока якоря и более 17 А каждой фазы. Низкочастотные (по отношению к частоте ШИМ) составляющие колебания токов фаз и якоря при заданном неизменном токе якоря составляют менее 1 А и незаметны на временных диаграммах, что указывает на стабильную работу рассматриваемого ЭП с независимыми РТ в каждой фазе и с конденсаторами параллельно питанию, вместе с сопротивлением накопителей создающими в цепи управление дополнительное апериодическое звено.

В обоих случаях токи АБ и СКБ равны среднему значению импульсных токов С1 и С2, а ток якоря сумме токов фаз, что подтверждает сохранение заряда в построенной модели.

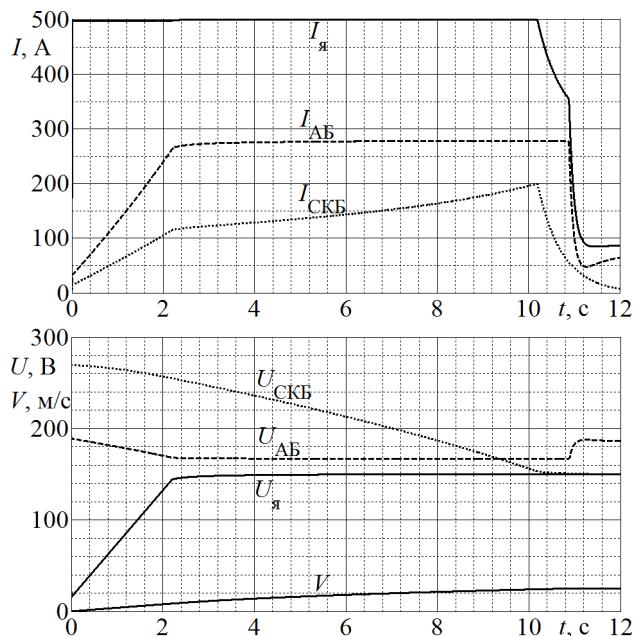


Рисунок 5 – гладкая составляющая токов и напряжений накопителей и якоря МПТ при разгоне до 25 м/с

При этом амплитуда пульсации I_{AB} в рассмотренных режимах составляет 3,7% от среднего значения, а I_{SKB} – 22%, то есть в ~6 раз больше. Это также соответствует предполагаемому отличию, так как рассматривается работа с конденсаторами С1 и С2 одинаковой ёмкости для обеспечения одинаковой амплитуды пульсаций напряжения на накопителях при одинаковом среднем напряжении на них, но сопротивление АБ в 4,5 раза больше сопротивления СКБ и в заданном режиме работы напряжение СКБ в ~1,2 раза больше напряжения АБ.

При начальных напряжениях АБ и СКБ соответствующих их максимальному заряду промоделирован процесс разгона от 0 до 25 м/с на горизонтальной дороге. Полученные временные диаграммы токов и напряжений показаны на рисунке 5. В начале разгона до момента времени 2,2 с увеличивается напряжение якоря до номинального значения из-за увеличения ЭДС, что при постоянном токе якоря сопровождается увеличением токов АБ и СКБ, при чём происходит заметная (~22 В) просадка напряжения АБ из-за её сопротивления. Дальнейший разгон происходит во 2-й зоне управления МПТ с уменьшением потока возбуждения, сопровождаясь заметным разрядом СКБ с 270 В до 150 В и увеличением его тока со 120 до 200 А, соответственно напряжение якоря и ток АБ почти не меняются до момента времени 10,2 с, когда при разряде СКБ её напряжение уменьшается до напряжения якоря, соответственно СКБ перестаёт отдавать энергию и разгон продолжается лишь за счёт энергии из АБ. В интервале времени 10,8...11,2 с при выходе скорости на заданное максимальное значение 25 м/с уменьшается ток до необходимого для преодоления статической нагрузки от трения и сопротивления воздуха, а напряжение АБ увеличивается из-за уменьшения его просадки на её сопротивлении.

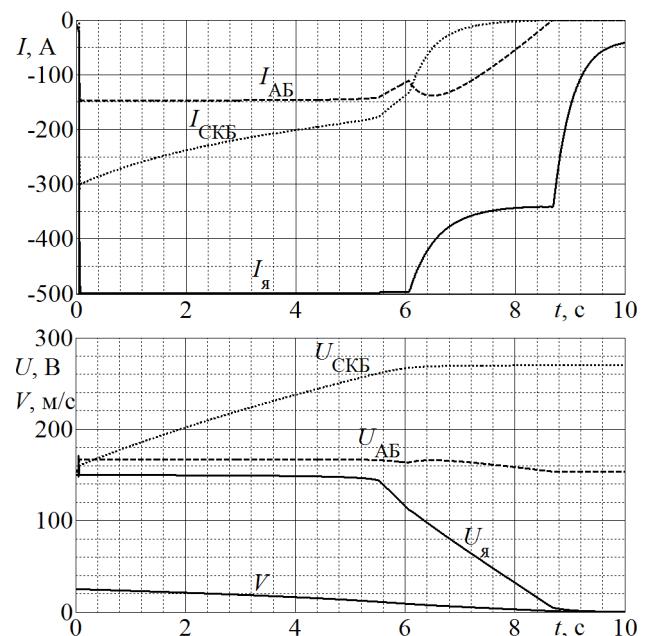


Рисунок 6 – гладкая составляющая токов и напряжений накопителей и якоря МПТ при торможении до 25 м/с

Промоделирован также процесс торможения от 25 до 0 м/с на дороге с движением вниз под уклон $\operatorname{tg}\alpha = 0,05$ с начальными напряжениями АБ и СКБ соответствующими их минимальному разряду. Полученные временные диаграммы токов и напряжений показаны на рисунке 6. До момента времени 5,5 с происходит торможение с постоянными токами якоря и АБ также, как и во время разгона при работе МПТ во 2-й зоне управления, после чего начинает уменьшаться напряжение якоря. В процессе заряда СКБ происходит значительное увеличение напряжение, что вызывает уменьшение её тока для поддержания неизменных фазных токов. Когда в момент времени 6,1 с СКБ достигает заданного максимально допустимого напряжения 270 В, то система управления уменьшает ток фаз от СКБ для предотвращения её перезаряда, соответственно, уменьшается суммарный ток якоря. С момента времени 8,7 с, когда электромобиль достигает малой скорости и ЭДС уже недостаточно для создания заданного тока из-за потерь на активном сопротивлении якорной цепи, начинается уменьшение тока якоря. Так как система управления удерживает ключи К2, К4, К6 и К8 в открытом состоянии, ток АБ при этом нулевой.

Выводы. Использование многофазного преобразователя уменьшает пульсации тока якоря, аккумуляторной и суперконденсаторной батарей, уменьшая потери энергии и нагрев, что увеличивает срок службы накопителей. Кроме того такой преобразователь позволяет распределить мощность двигателя между аккумуляторами и суперконденсаторами, уменьшая потери энергии в них при использовании одновременно обоих, а также обеспечивая торможение на продолжительных спусках с рекуперацией части энергии в аккумуляторы. Моделирование подтвердило стабильность работы рассмотренного электропривода без значительных низкочастотных (по отношению к частоте широтно-импульсной модуляции) колебаний токов фаз и якоря.

Список литературы

1. *Britain to bring forward ban on new petrol and diesel cars.* URL: <https://www.channelnewsasia.com/news/world/britain-bring-forward-new-petrol-diesel-cars-ban-2035-12390042>. (дата обращения 10.01.2020).
2. *В Европе новых электромобилей зарегистрировано почти 150000 единиц в 2017 году.* URL: <https://hevcars.com.ua/reviews/top-elektromobiley-i-evropeyskih-stran-po-rostu-prodazh-v-2017-godu/>. (дата обращения 10.01.2020).
3. Клепиков В.Б., Гончар А.С., Семиков А.В. и др. Из опыта создания электропривода электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* Харків: НТУ «ХПІ», 2015, №112 (1121). С. 195 – 198.
4. Семиков А.В. Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в электроприводе электромобиля с суперконденсаторной батареей. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* Харків: НТУ «ХПІ», 2015, №112 (1121). С. 93 – 95.
5. Rashid M.H. *Power Electronics Handbooks.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018. 1522 p.
6. Клепиков В.Б., Семиков А.В. Энергоэффективность рекуперативных режимов электромобиля. *Технічна електродинаміка.* Київ: ІЕД НАНУ 2017, №6. С. 36 – 42.
7. *Motenergy Brush-Type DC Motors 3-20 HP.* URL: <http://www.motenergy.com/brdcmo.html>. (дата обращения 10.01.2020).
8. Семиков А.В., Воинов В.В. К выбору параметров тягового электродвигателя электромобиля. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* Харків: НТУ «ХПІ», 2019, №9 (1334). С. 88 – 93.
9. *Ultracapacitor product line.* URL: <http://yunasko.com/en/products>. (дата обращения 10.01.2020).

References (transliterated)

1. *Britain to bring forward ban on new petrol and diesel cars.* URL: <https://www.channelnewsasia.com/news/world/britain-bring-forward-new-petrol-diesel-cars-ban-2035-12390042>. (accessed 10.01.2020).
2. *V Evrope novyh elektromobilej zaregistrirovano pochti 150000 edinic v 2017 godu* [Nearly 150,000 units registered in Europe for new electric vehicles in 2017]. URL: <https://hevcars.com.ua/reviews/top-elektromobiley-i-evropeyskih-stran-po-rostu-prodazh-v-2017-godu/>. (accessed 10.01.2020).
3. Klepikov V.B., Gonchar A.S., Semikov A.V. i dr. Iz opyta sozdaniya elektroprivoda elektromobilya s superkondensatornym nakopitelem energii [From the experience of creating an electric electric drive with a supercapacitor energy storage]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu "Kharkivskyi politekhnichnyi instytut". Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoriia i praktyka* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2015, №112 (1121). pp. 195 – 198.
4. Semikov A.V. Komp'yuternoe modelirovaniye elektromagnitnyh processov v elektroprivode elektromobilya s superkondensatornoj batareej [Computer simulation of electromagnetic processes in an electric vehicle electric drive with a supercapacitor battery]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu "Kharkivskyi politekhnichnyi instytut". Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoriia i praktyka* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2015, №112 (1121). pp. 93 – 95.
5. Rashid M.H. *Power Electronics Handbooks.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018. 1522 p.
6. Klepikov V.B., Semikov A.V. *Energoeffektivnost' rekuperativnyh rezhimov elektromobilya* [Energy efficiency of electric vehicle recuperative modes]. *Tekhnichna elektrodinamika.* [Technical Electrodynamics]. Kyiv: IED NANU. 2017, №6. pp. 36 – 42.
7. *Motenergy Brush-Type DC Motors 3-20 HP.* URL: <http://www.motenergy.com/brdcmo.html>. (accessed 10.01.2020).
8. Semikov A.V., Voynov V.V. K vyboru parametrov tyagovogo elektrodvigatelya elektromobilya [To select parameters of electric vehicle electric motor]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu "Kharkivskyi politekhnichnyi instytut". Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoriia i praktyka* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2019, №9 (1334). pp. 88 – 93.
9. *Ultracapacitor product line.* URL: <http://yunasko.com/en/products>. (accessed 10.01.2020).

Поступила 25.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Семиков Алексей Владимирович (Семиков Олексій Володимирович, Semikov Oleksij Volodymyrovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: a.v.semikov@gmail.com

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

Серія «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», № 4 (1358) 2020

B. V. VOROBIOV**ENERGY EFFICIENT ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF AN ELECTROMOBILE**

The introductory part of the article describes the relevance of developments in the field of electric vehicles, as well as an economic analysis of the feasibility of using electricity as fuel instead of gasoline on the example of some mass-produced cars. Based on the general requirements for vehicles, a functional diagram of an asynchronous electric drive of an electric vehicle with a supercapacitor battery was built and justified as an intermediate link for the accumulation of electrical braking energy, all elements of the electric drive are described and justified. The parameters of a supercapacitor battery are obtained that can provide the necessary capacity for energy recovery. The optimal structure of the power energy converter was selected, as well as the necessary control algorithms. A mathematical computer model of the electric drive has been built, taking into account all the loads that the electric car experiences during movement, and also allowing modeling the necessary coordinates in various urban cycles of vehicle traffic. A computer simulation of the characteristics of the system was carried out when driving on a horizontal road, as well as when driving from a slope at an angle of 20°. The characteristics of changes in the voltage on the battery of supercapacitors during regenerative braking are obtained, which allow us to obtain data on the nature of the processes in the battery at each stage of the motion cycle. Transient processes of engine speed and torque are obtained that correspond to the driving influences and the selected control method. The adequacy of the computer model is confirmed and the obtained data are compared with the experimental data presented in the sources. Quantitative indicators of energy recovered in a supercapacitor battery are obtained.

Keywords: electric drive, supercapacitor, regenerative braking, saving energy.

Б. В. ВОРОБІЙОВ**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ЕЛЕКТРОМОБІЛЮ**

У вступній частині статті описується актуальність розробок у напрямку електромобілебудування, а також проведено економічний аналіз доцільності використання електроенергії в якості палива замість бензину на прикладі деяких серійних автомобілів, що випускаються у наш час. Спираючись на загальні вимоги, що пред'являються до транспортних засобів, була побудована і обґрунтovanа функціональна схема асинхронного електроприводу електромобіля зі суперконденсаторною батареєю у якості проміжної ланки накопичення електричичної енергії гальмування, описані та обґрунтовані всі елементи електроприводу. Отримано параметри суперконденсаторної батареї, які зможуть забезпечити необхідну ємність для рекуперації енергії. Обрана оптимальна структура силового перетворювача енергії, а також необхідні алгоритми управління. Побудовано математичну комп'ютерну модель електроприводу, що враховує всі навантаження, які випробовує електромобіль під час руху, а також дозволяє проводити моделювання необхідних координат в різних міських циклах руху транспорту. Проведено комп'ютерне моделювання характеристик системи, що рухається по горизонтальній дорозі, а також при русі зі схилу під кутом 20°. Отримано характеристики зміни напруги на батареї суперконденсаторів під час рекуперативного гальмування, які дозволяють отримати дані про характер процесів, що відбуваються в батареї на кожному з етапів циклу руху. Отримано переходні процеси швидкості та моменту двигуна, які відповідають задаючій дії та обраному методу управління. Підтверджено адекватність комп'ютерної моделі електроприводу та отримані дані зіставлені з представленими в джерелах експериментальними даними. Отримано кількісні показники уведеннях в суперконденсаторна батарею енергії.

Ключові слова: електропривод, суперконденсатор, рекуперативне гальмування, енергозбереження.

Б. В. ВОРОБЬЁВ**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ**

Во вступительной части статьи описывается актуальность разработок в области электромобилестроения, а также проведен экономический анализ целесообразности использования электроэнергии в качестве топлива вместо бензина на примере некоторых серийно-выпускаемых автомобилей. Опираясь на общие требования, предъявляемые к транспортным средствам, была построена и обоснована функциональная схема асинхронного электропривода электромобиля с суперконденсаторной батареей в качестве промежуточного звена накопления электрической энергии торможения, описаны и обоснованы все элементы электропривода. Получены параметры суперконденсаторной батареи, которые смогут обеспечить необходимую ёмкость для рекуперации энергии. Выбрана оптимальная структура силового преобразователя энергии, а также необходимые алгоритмы управления. Построена математическая компьютерная модель электропривода, учитывающая все нагрузки, которые испытывает электромобиль во время движения, а также позволяющая проводить моделирование необходимых координат в различных городских циклах движения транспорта. Проведено компьютерное моделирование характеристик системы при движении по горизонтальной дороге, а также при движении со склоном под углом 20°. Получены характеристики изменения напряжения на батарее суперконденсаторов во время рекуперативного торможения, которые позволяют получить данные о характере протекающих процессов в батарее на каждом из этапов цикла движения. Получены переходные процессы скорости и момента двигателя, которые соответствуют задающим воздействиям и выбранному методу управления. Подтверждена адекватность компьютерной модели и полученные данные сопоставлены с представленными в источниках экспериментальными данными. Получены количественные показатели рекуперированной в суперконденсаторную батарею энергии.

Ключевые слова: электропривод, суперконденсатор, рекуперативное торможение, энергосбережение

Introduction. Consuming a significant amount of oil resources, as well as the deteriorating environmental situation in large cities, associated with an increase of the concentration of car exhausts (one liter of burned gasoline leads to the formation of approximately 16 m³ or 16,000 liters of a mixture of different gases), require a transition to alternative energy sources. This problem is especially relevant for Ukraine, which is provided with own re-

sources only by 48%. In this case, a strong dependence on imports of petroleum products leads to the fact that gasoline prices are rising rapidly. According to statistics [1], Ukraine in January-August 2017 imported petroleum products in monetary terms by 2.466 billion dollars, which is 30% more than the same period last year.

As a result, imports accounted for more than half of the domestic oil products. In addition, research shows that

© B. V. Vorobiov, 2020

oil reserves are inexorably declining. In this regard, it is necessary to seek new means that will help in solving existing problems.

An alternative to existing internal combustion engines is an electric drive (ED). The development of electric vehicles worldwide is extremely relevant now. At this stage of development, electric vehicles are inferior in a number of respects to gasoline or diesel cars, but their advantages are undeniable: high energy efficiency, environmental friendliness, simplicity of design and maintenance, using of cheaper energy (in comparison with gasoline), noise reduction. Already, more than 2 million electric vehicles are in operation in the world, and the monthly increase in sales (2016) is about 15% [2]. According to the latest calculations, the total energy efficiency of the electric vehicle (0.97 km / MJ for Tesla Roadster) is significantly (almost 3 times) higher than the energy efficiency of gasoline vehicles (0.38 km / MJ for Honda Civic VX) [3].

Due to the mass production and limited mining of rare earth metals, which are the basis of permanent magnets for traction synchronous motors of electric vehicles, they will be gradually replaced by asynchronous electric motors (AM), which at a lower maximum moment have a number of undeniable advantages: simplicity of design, lower cost, etc. The main goal of the electric vehicles market segment (today it is occupied by budget models, such as Nissan Leaf) is to reduce the cost of electric vehicles by reducing the cost of battery, as well as optimizing modes of regenerative braking.

Main part. The purpose of this work is to create a computer model of an asynchronous electric drive of an electric vehicle using a supercapacitor battery as a buffer source of electric power, do the computer modeling and researching of recuperative braking modes.

The form of the functional scheme is determined by the nature of the energy conversion during the movement of the electric vehicle. The energy source is a rechargeable battery of accumulators (BP), which provides a constant voltage U_b as the output. The conversion of the DC voltage into an AC is provided by a three-phase autonomous power inverter (PI), which performs the frequency and voltage regulation functions according to Kostenko's law [4].

$$\frac{U}{f} = \frac{U_{\text{nom}}}{f_{\text{nom}}} = \text{const} \quad (1)$$

The inverter is controlled by a microprocessor unit (MCU), which switches the keys of an autonomous inverter according to the PWM algorithm. The transformation of electrical energy into mechanical energy is carried out by the AM, on the shaft of which the driving moment is formed. Increasing torque on the shafts of the wheels with a corresponding reduction in speed is achieved with the help of a mechanical gearbox. Thus, it is advisable to perform the functional diagram of the ED in the form shown in Fig. 1. The power channel of the electromechanical system includes the MCU, the power semiconductor converter, the electric motor, the mechanical transmission, the differential and the pair of wheels.

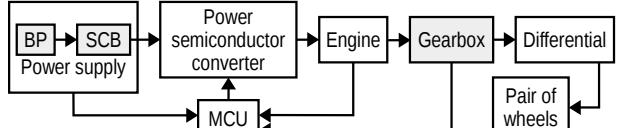


Fig. 1. Functional diagram of electric vehicle electric drive

The power system contains the main power source – BP and connected in parallel supercapacitor battery (SCB) for the regeneration of the braking energy.

This scheme contains one electric motor, which transmits energy to the wheels using a mechanical differential. As a power electronic unit, an inverter is used. It converts the DC voltage of the battery into an AC supply. While braking, it goes into rectification mode to recover energy into the SCB. The control unit of the inverter implements the PWM principle.

The signals generated when the acceleration and brake pedals are goes to the input of the electronic control unit of the inverter and then to the power electronic converter that controls the operation of the electric machine part of the drive. It is assumed that the mechanical part of the car remains unchanged. The gearbox, front-wheel drive, as well as data on the required torque at start-up are stored. The advantage of this scheme is the possibility of using recuperative operation modes of the ED, which ensure the return of the braking energy into the SCB and its further use during further acceleration. Such modes occur with prolonged descents, as well as braking, which are especially frequent in the urban cycle of motion. Figure 2 shows a simplified schematic electrical diagram of the power part of the electric drive of an electric vehicle.

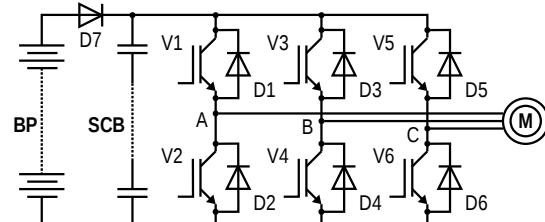


Fig. 2. Schematic diagram of the power part of the electric drive electric vehicle

In this scheme, the BP is a rechargeable battery that acts as a source of electricity. In the propulsion mode, the PI is powered by a battery of accumulators, modulating the three-phase sinusoidal voltage for the motor. Some of the kinetic energy of the motion being converted into an electromagnetic one and accumulating in the inductance of the stator circuit. While switching to braking mode, the PI enters the rectifier mode. The rectified current enters the SCB, charging it with electrical energy. At the same time diode D7 prevents the charging current, reaching 300 A, from flowing through the BP. The charging process is accompanied by a decrease in the electromagnetic energy in the inductance, raising the voltage on the SCB.

After the end of the braking mode and the transition to driving mode, the electric energy for the electromobile movement is first taken up from the SCB until its voltage is equal to the voltage of the BP, after which it comes into work.

The values of the motor and braking torques of the electric drive are set by the microprocessor controlling the state of the keys of the PI, and are determined by the position of the acceleration pedal.

The required capacity of the SCB is determined from the condition:

$$E_{SCB} \geq (E_K + \Delta E_P - A_{fr}) \cdot \eta_{ED}, \quad (2)$$

where E_K – kinetic energy before braking, J ;

ΔE_P – change in potential energy, J ;

A_{fr} – work done to overcome frictional forces on the road and air resistance, J ;

η_{ED} – efficiency of the electric drive, $\eta_{ED} \leq 90\%$.

$$E_k = \frac{m V_{in}^2}{2}, \quad (3)$$

where V_{in} – initial speed of movement, m/s.

$$\Delta E_P = m \cdot g \cdot \Delta h, \quad (4)$$

where Δh – change in altitude above sea level, m.

$$A = \int_0^{S_r} (F_{fr} - F_{fact}) dS, \quad (5)$$

where S_r – stopping distance, m;

S – coordinate of the path, m.

Calculations from relations (2) ÷ (5) showed that for an electric vehicle weighing 1500 kg, taking into account possible long runs, a SCB of about 2.75 F is sufficient at a maximum voltage of 600 V, which corresponds to 500 kJ.

The computer model of the system shown in Fig. 3, is built according to the functional scheme (Figure 1) in the Matlab package and is compiled on the standard elements of the SimPowerSystems library.

The model consists of the following main blocks:

- Power supply system;
- Inverter (IGBT-Inverter);
- Asynchronous motor;
- Control system;
- Load torque forming unit;
- Transmission;
- Measuring unit;
- Parameter initialization block.

The results of simulation of acceleration, steady-state motion and regenerative braking of an electric vehicle while driving on a flat road ($\alpha = 0$) are shown in Fig. 4, 5.

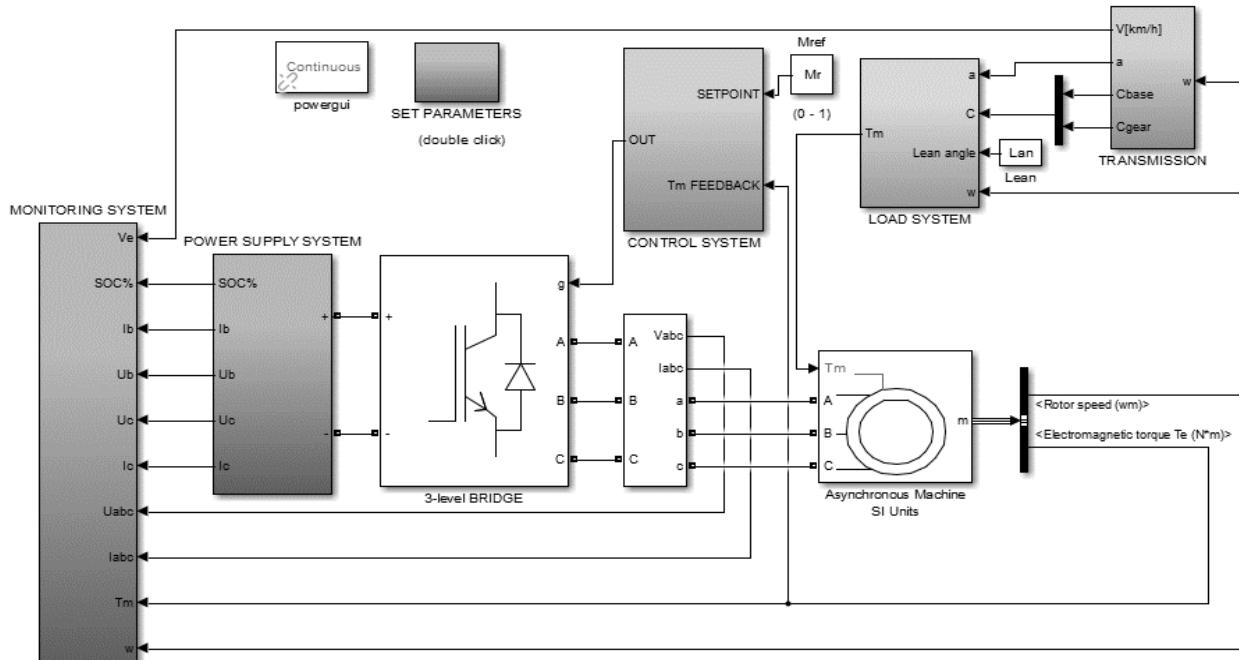


Fig. 3. Computer model of electric vehicle ED with a SCB in MATLAB package

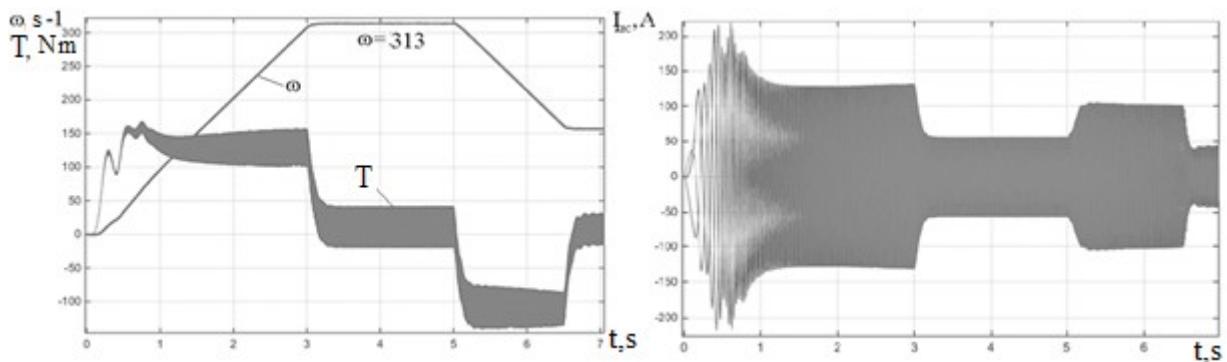
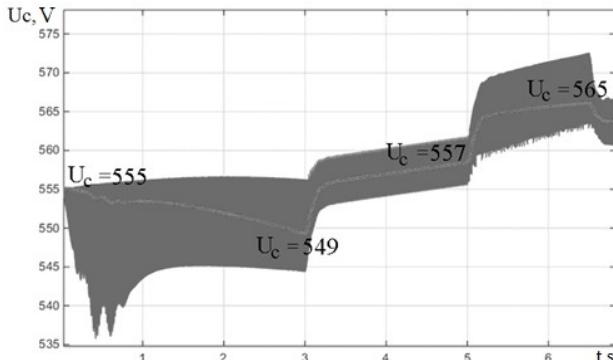


Fig. 4. Acceleration and regenerative braking of an electric vehicle at $\alpha = 0$

Fig. 5. Voltage at the SCB of an electric vehicle at $\alpha = 0$

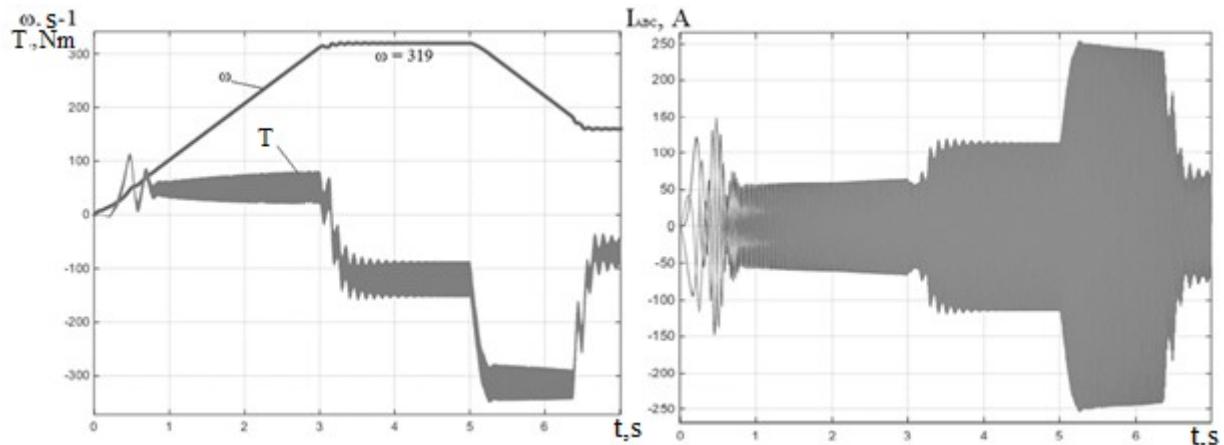
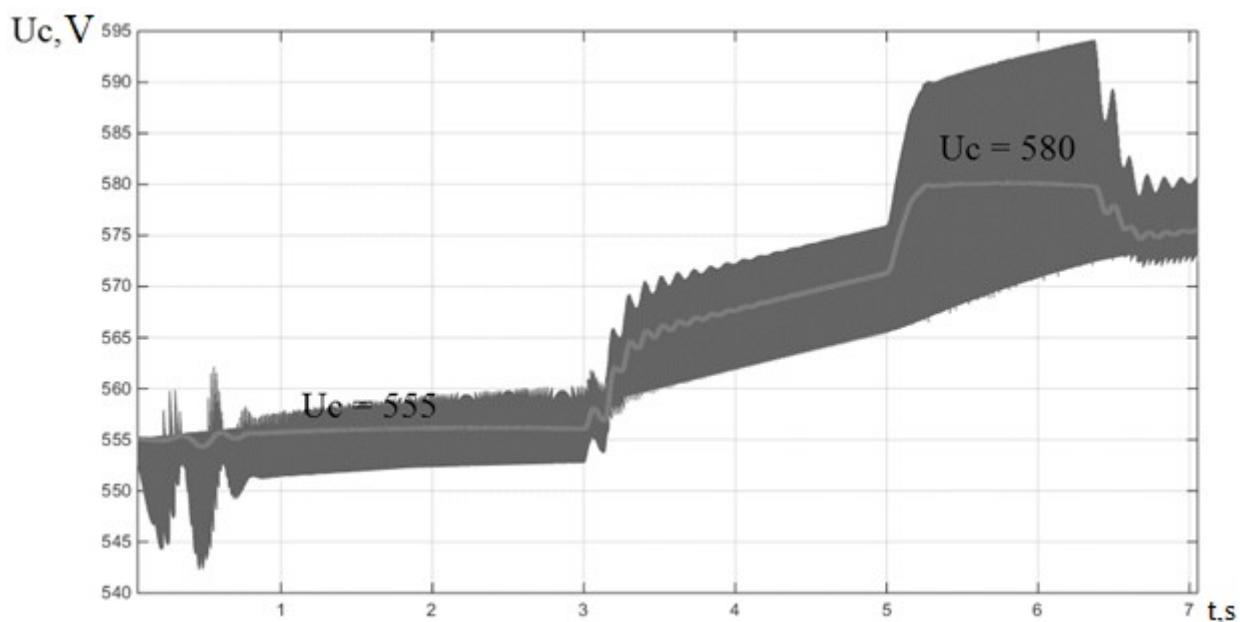
To enter the recuperative mode, the speed of the AM must exceed the idle speed. Frequency control, which is used in this system, allows to change the idle speed in the whole range of speed control, which allows to realize regenerative braking at any initial and final speeds.

The voltage on the SCB when moving with $\alpha = 0$ is shown in Fig. 5.

The results of simulation of acceleration, steady-state motion and regenerative braking of an electric vehicle when driving on an declined road (downward movement with $\alpha = -20^\circ$) are shown in Fig. 6, 7.

In this mode, an additional force acts on the electro-mobile, proportional to the sine of the slope of the road and directed along the movement of the electric vehicle, which means that the torque formed by this force will be subtracted from the load torque. In steady-state motion, the value of this force exceeds the total load torque due to the fact that the dynamic component of the load torque is equal to zero. From the above, we can conclude that the energy will be recovered into the SCB, even during the steady-state traffic. Voltage on the SCB during descent ($\alpha = -20^\circ$) is shown in Fig. 7th

From the graphs of transient processes it is seen that during braking the voltage of the SCB on the corresponding section increases, which indicates the presence of energy recovery. When braking in a fixed transmission to half the rated speed of the engine, the saved energy is about 40 kJ (braking was carried out at the maximum speed of the electric vehicle in the first gear).

Fig. 6. Acceleration and regenerative braking of an electric vehicle at $\alpha = -20^\circ$ Fig. 7. Voltage at the SCB of an electric vehicle at $\alpha = -20^\circ$

Conclusions. The results of computer modeling showed the adequacy of the mathematical model to physical processes at various stages of the movement, confirmed the effect of energy recovery in brake modes, and also made it possible to draw a conclusion about the expediency of developing a power circuit of an electric drive using buffer energy storage devices in the form of supercapacitors. Numerical calculations of the energy saved by recuperative braking were also carried out.

As a result, a mathematical computer model is obtained that adequately reflects the nature of the processes in a real electric vehicle [5], [6], [7].

Список літератури

1. Енергетична галузь України: підсумки 2015 року. URL: http://razumkov.org.ua/uploads/article/2016_ener_gal_pidsumky_2015.pdf. (дата звернення 12.12.2019).
2. Global BEV & PHEV Sales for 2019. URL: <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>. (дата обращения 15.01.2020).
3. Eberhard M., Tarpenning M. The 21st Century Electric Car. URL: http://www.veva.bc.ca/ztw/Tesla_20060719.pdf. (дата обращения 15.01.2020).
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением: учебник для студ. высш. учеб. завед. / Под ред. Г.Г. Соколовского. Москва: Издательский центр «Академия», 2006. 265 с.
5. Гончар А.С., Семиков А.В. К реализации рекуперативных режимов в электроприводе электромобиля с ионисторами. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Зб. наук. праць Х Міжнародної наук.-техн. конф. молодих ученых і спеціалістів 28-29 березня 2012. Кременчук: КрНУ, 2012. С. 342 – 343.
6. Клепиков В.Б., Гончар А.С., Моисеев А.Н., Семиков А.В., Малетин Ю.А., Жихарев А.Н. Лабораторные исследования электропривода электромобиля с суперконденсаторной батареей. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Харків: НТУ «ХПІ», 2013, №36(1009). С. 441 – 444.
7. Gonchar O., Semikov O. Elektroantrieb des E-Autos mit integriertem Energiemanagementsystem und Gleichstrommotor. Conference Proceedings Effizienz, Präzision, Qualität: 11 Magdeburger Maschinenbau-Tage. Magdeburg: OVGU, Deutschland, 25-26 September, 2013. B5.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Воробйов Богдан Віталійович (Вороб'єв Богдан Витальевич, Vorobiov Bohdan Vitaliyovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: volt.education@gmail.com

References (transliterated)

1. Enerhetychna haluz Ukrayny: pidsumky 2015 roku. URL: http://razumkov.org.ua/uploads/article/2016_ener_gal_pidsumky_2015.pdf. (accessed 12.12.2019).
2. Global BEV & PHEV Sales for 2019. URL: <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>. (accessed 15.01.2020).
3. Eberhard M., Tarpenning M. The 21st Century Electric Car. URL: http://www.veva.bc.ca/ztw/Tesla_20060719.pdf. (accessed 15.01.2020).
4. Sokolovskij G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zaved [Frequency Controlled AC Electric Drives: textbook for university students] / red. G.G. Sokolovskogo. Moskva: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2006. 265 p.
5. Gonchar A.S., Semikov A.V. K realizacii rekuperativnyh rezhimov v elektroprivode elektromobilya s ionistorami [To the implementation of regenerative modes in an electric drive of an electric vehicle with ionitors]. Elektromekhanichni ta enerhetychni sistemy, metody modeliuvannia ta optymizatsii: Zb. nauk. prats X Mizhnarodnoi nauk.-tekhn. konf. molodykh uchenykh i spetsialistiv 28-29 bereznia 2012 r., Kremenchuk [Electromechanical and power systems, modeling and optimization methods: Collection of works of the X International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists]. Kremenchuk: KrNU, 2012. pp. 342 – 343.
6. Klepikov V.B., Gonchar A.S., Moiseev A.N., Semikov A.V., Maletin YU.A., ZHiharev A.N. Laboratornye issledovaniya elektroprivoda elektromobilya s superkondensatornoj batareej [Laboratory studies of an electric vehicle electric drive with a supercapacitor battery]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut». Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoria i praktika [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013, №36(1009). pp. 441 – 444.
7. Gonchar O., Semikov O. Elektroantrieb des E-Autos mit integriertem Energiemanagementsystem und Gleichstrommotor. Conference Proceedings Effizienz, Präzision, Qualität: 11 Magdeburger Maschinenbau-Tage. Magdeburg: OVGU, Deutschland, 25-26 September, 2013. B5.

Received 02.02.2020

О. Г. ГРИБ, Г. А. СЕНДЕРОВИЧ, О. В. ДЯЧЕНКО, І. Т. КАРПАЛЮК, С. В. ШВЕЦЬ

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТКОВОЇ УЧАСТІ СУБ'ЄКТІВ У ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ ЗА ПОРУШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПО СИНУСОЇДАЛЬНОСТІ КРИВОЇ НАПРУГИ

Впровадження в експлуатацію електронних лічильників електричної енергії дозволяє використовувати можливості сучасної елементної бази, в тому числі для їх використання в локальних засобах обліку. Сучасна елементна база дозволяє використовувати локальні засоби обліку, які крім основної функції визначення кількості, переданої електроенергії на границі розділу балансової принадлежності можуть виконувати ряд функцій, не властивих лічильникам електричної енергії. Одне з основних доповнень, які вводять в ці пристрої - оцінка електромагнітної сумісності шляхом вимірювання показників якості електроенергії. У зв'язку з цим актуальною стала задача розробки методів, використання яких можливе в пристроях, що працюють локально. В статті проводиться аналіз методів і методик детермінованого визначення часткової участі суб'єктів у відповідальності за порушення якості електричної енергії по синусоїdalності кривої напруги на можливість використання їх в локальних засобах обліку.

Ключові слова: якість електроенергії, показники якості електроенергії, синусоїdalність напруги, локальний засіб обліку, гармоніка, параметричний підхід, детерміновані розрахунки, відповідальність.

О. Г. ГРИБ, Г. А. СЕНДЕРОВИЧ, А. В. ДЯЧЕНКО, І. Т. КАРПАЛЮК, С. В. ШВЕЦЬ

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛЕВОГО УЧАСТИЯ СУБЪЕКТОВ В ОТВЕТСТВЕННОСТИ ЗА НАРУШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО СИНУСОИДАЛЬНОСТИ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Внедрение в эксплуатацию электронных счётчиков электрической энергии позволяет использовать возможности современной элементной базы, в том числе для их использования в локальных средствах учёта. Современная элементная база позволяет использовать локальные средства учёта, кроме основной функции определения количества, передаваемой электроэнергии на границе раздела балансовой принадлежности они могут выполнять ряд функций, не свойственных счётчикам электрической энергии. Одно из основных дополнений, которые вводят в эти устройства - оценка электромагнитной совместимости путём измерения показателей качества электроэнергии. В связи с этим актуальной стала задача разработки методов, использование которых возможно в устройствах, работающих локально. В статье проводится анализ методов и методик детерминированного определения долевого участия субъектов в ответственности за нарушение качества электрической энергии по синусоидальности кривой напряжения на возможность использования их в локальных средствах учёта.

Ключевые слова: качество электроэнергии, показатели качества электроэнергии, синусоидальность напряжения, локальное средство учёта, гармоника, параметрический подход, детерминированные расчёты, ответственность.

O. H. HRYB, G. A. SENDEROVICH, O. V. DIACHENKO, I. T. KARPALIUK, S. V. SHVETS

ANALYSIS OF METHODS OF DETERMINATION OF PARTIAL PARTICIPATION OF SUBJECTS IN RESPONSIBILITY FOR VIOLATION OF ELECTRICITY QUALITY ON SINUSOID CURRENT VOLTAGE

In power engineering, one of the most important aspects of power saving and environmental friendliness is improving the quality of electricity and ensuring electromagnetic compatibility. Electricity quality is directly related to the cost-effectiveness of electricity production, distribution, and consumption, since the output of electricity quality indicators beyond the acceptable values leads to increased power losses in the elements of the electrical network, shortens the life of electrical equipment and impairs the operating conditions of electric receivers. Electricity quality affects the production process and product quality, as the violation of the requirements for electricity quality indicators leads directly to the disruption of technological processes. Electricity quality is also associated with some social problems. For example, unacceptable voltage deviations in lighting networks cause a decrease in illumination, which affects the organs of vision. Existing methodologies that determine responsibility for the violation of the quality of electricity based on the calculation of the partial participation of subjects in violation of the requirements for the quality of electricity, focused on the use of digital software and hardware complex, made on the basis of electronic computers and installed at the point of common connection. The introduction of electronic energy meters allows the use of modern element base, including for use in local metering facilities. The modern elemental base allows the use of local metering tools which, in addition to the basic function of determining the amount of transmitted electricity at the boundary of the balance section, can perform a number of functions that are not characteristic of electricity meters. One of the main additions to these devices is the evaluation of electromagnetic compatibility by measuring the quality of electricity. In this regard, the urgent task was to develop methods that can be used in devices that work locally. The article analyzes the methods and techniques of deterministic determination of the partial participation of subjects in the responsibility for the violation of the quality of electrical energy on the sine wave of the voltage curve for the possibility of using them in local accounting tools.

Keywords: electricity quality, electricity quality indicators, sinusoidal voltage, local metric, harmonic, parametric approach, deterministic calculations, responsibility.

Вступ. В умовах ринкової економіки мережеве підприємство і споживач виступають як рівні комерційні партнери, суб'єкти єдиного процесу розподілу і споживання електричної енергії (ЕЕ). Для забезпечення зацікавленості в підвищенні якості електроенергії (ЯЕ) необхідно забезпечити такі умови, при яких збитки, які несуть суб'єкти процесу розподілу ЕЕ, оплачували дійсні винуватці.

У міжнародній практиці визначення відповідальності за порушення ЯЕ домінують два принципи визначення допустимості приєднання споживача до мережі в разі порушення вимог до показників якості електроенергії (ПЯЕ), які можна висловити логічними формулами: «платить останній» і «кожен платить свою частку» [1].

Відповідно до першого принципу приєднання споживачів здійснюється практично без обмежень до тих пір, поки ПЯЕ не вийдуть за межі допустимих значень. Споживачі, приєднані згодом, несуть додаткові витрати, зумовлені необхідністю компенсації внесених спотворень, що призводять до порушення стандарту. Цей принцип характерний для електричних мереж, в яких вимоги до ПЯЕ враховувалися протягом всього часу їх розвитку та експлуатації.

Для України, країни з розвиненими електричними мережами, в яких заходів щодо дотримання ЯЕ традиційно не достатньо, доцільно використовувати другий принцип, який передбачає індивідуальну відповідальність суб'єктів і теж широко використовуваний у світовій практиці експлуатації електричних мереж. Згідно з цим принципом кожен суб'єкт процесу розподілу ЕЕ має право на внесення своєї частки спотворень, але при цьому зобов'язаний компенсувати збитки від зниження ЯЕ, відповідно цієї частки. Об'єктивну оцінку часткової участі в компенсації збитку доцільно покласти на детерміновані розрахунки, позбавлені фактору впливу на їх результат з боку постачальника або споживачів електричної енергії.

Виділяють два основних підходи визначення участі постачальників та споживачів електричної енергії в відповідальності за порушення ЯЕ: договірний і параметричний.

Договірний підхід [2] передбачає в разі порушення ЯЕ введення по відношенню до суб'єктів розподілу ЕЕ штрафних санкцій, обумовлених відповідним договором або законодавчим актом. Договірний підхід знайшов основне застосування в практиці експлуатації електричних мереж у всіх країнах. Українськими [3] і закордонними [4] вченими розроблені різні методики для розрахунку відповідальності суб'єктів за порушення ЯЕ, що стимулюють підвищення їх зацікавленості в дотриманні вимог до ПЯЕ. Методики договорів підходів базуються на статистичних дослідженнях і носять імовірнісний характер.

Дані методики, спираючись на пакет правових документів, дають важелі впливу на суб'єкти процесу розподілу ЕЕ з метою підвищення її якості. При всій їх обґрунтованості, десь дійсній, десь удаваний, нормативний підхід не визначає дійсної участі суб'єктів в порушенні ПЯЕ, носить імовірнісний характер і дозволяє мати місце суб'єктивним тенденціям превалювання інтересів природних монополістів енергетиків, з одного боку, або споживачів, які захищені законодавством, з іншого.

Для реалізації параметричного підходу потрібна науково обґрунтована методика, що дозволяє розрахувати дійсну участі суб'єктів в порушенні ЯЕ за параметрами конкретного режиму і схеми експлуатованої електричної мережі. Цей підхід лежить в основі відомих методів детермінованого визначення часткової участі суб'єктів у відповідальності за порушення ЯЕ [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З аналізу параметричного підходу [5] випливає, що першими спробами детермінованого рішення можна вважати роботи [6, 7], в яких визначення часткової участі здійснюється за параметрами режиму електричної мережі. Як критерій часткової участі в відповідальності за порушення вимог ЯЕ по синусоїdalності кривої напруги і симетрії напруги використано напрямок і значення вторинних потужностей в точці загального приєднання (ТЗП). Параметричний підхід з використанням параметрів режиму електричної мережі ліг в основу методу [8]. Метод визначає фактичний внесок (ФВ) суб'єктів, що мають спотворювальні приймачі, які зумовлюють невідповідність ПЯЕ вимогам ГОСТ, і виходить з наступних положень:

– ФВ визначається для тих суб'єктів, які на даному інтервалі усереднення мають джерела струму спотворень;

– схема електропостачання будь-якого k -ого суб'єкта, приєднаного до ТЗП, на інтервалі усереднення, що дорівнює 3 с, може бути представлена у вигляді двополюсника, що складається з джерела струму спотворень і паралельно сполученого внутрішнього опору (рис. 1). Такою схемою можуть бути представлені схеми споживачів, так і схеми електропостачальних організацій;

– якщо джерело зневажливо мале, то схема електропостачання такого суб'єкта представляється тільки пасивним елементом – опором;

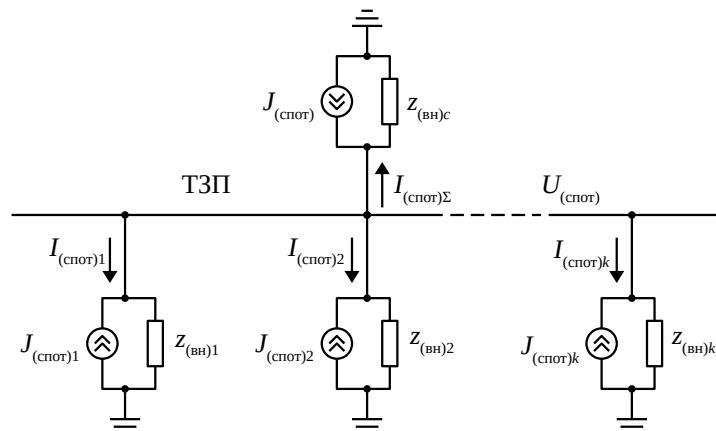


Рисунок 1 – Схема заміщення суб'єктів підключених до ТЗП

– якщо на інтервалі усереднення 3 с потужність джерела струму спотворення виявляється меншою в порівнянні з іншими джерелами струму, внаслідок чого струми спотворень, вимірювані на головній ділянці k -ї лінії, спрямовані до суб'єкта, то схема електропостачання такого суб'єкта також може бути представлена пасивним елементом - опором;

– якщо на інтервалі усереднення 3 с струми спотворень, вимірювані на головній ділянці k -ї лінії, мають напрямлення від суб'єкта до ТЗП, схема електропостачання k -го суб'єкта представляється джерелом струму спотворень.

Метод передбачає одночасне вимірювання параметрів режиму на всіх приєднаннях до ТЗП. При неможливості реалізації одночасних вимірювань слід провести попереднє виявлення споживачів, що містять спотворювальне навантаження. Виявляються фідер, які є джерелами спотворювальних струмів ($I_{(n)k}$, I_{2k}) і проводиться векторне підсумовування струмів що генеруються. Визначається модуль діючого значення струму еквівалентного джерела ($I_{\Sigma(n)}$, $I_{\Sigma2}$) на даному інтервалі часу. Решта суб'єктів усереднення представляються еквівалентним пасивним елементом з опором ($Z_{bx(n)}$, Z_{bx2}), модуль якого визначають за формулами:

$$Z_{bx(n)} = \frac{U_{(n)}^{\text{T3P}}}{I_{\Sigma(n)}} \quad (1)$$

$$Z_{bx2} = \frac{U_2^{\text{T3P}}}{I_{\Sigma2}} \quad (2)$$

де $U_{(n)}^{\text{T3P}}$, U_2^{T3P} – спотворювальна напруга в ТЗП.

Модуль вектора n -ї гармонійної складової напруги, створюваного k -м джерелом струму гармонійних спотворень на розглянутому інтервалі усереднення визначається за формулою:

$$U_{(n)k}^{\Phi B} = I_{(n)k} \cdot Z_{bx(n)}. \quad (3)$$

Аналогічно модуль вектора напруги зворотної послідовності, створюваного k -м джерелом струму зворотної послідовності:

$$U_{2k}^{\Phi B} = I_{2k} \cdot Z_{bx2} \quad (4)$$

Методи, які використовують визначення часткової участі за параметрами режиму електричної мережі [6, 7] і за параметрами схеми заміщення мережі [9], призначені для використання при обох видах порушень і мають загальні недоліки:

по-перше, недостовірність визначення місця положення джерел спотворень по вторинній потужності в силу наявності взаємних перетоків;

по-друге, використання розрахункових значень параметрів схем заміщення симетричних і гармонійних складових;

по-третє, відсутність обліку зміни рівня спотворень і часткової участі суб'єктів протягом часу експлуатації.

Усунення первого недоліку для визначення часткової участі при порушенні симетрії напруги забез-

печив метод, що використовує розрахункову модель, виконану в фазних координатах [10]. При цьому другий недолік, характерний для роботи з параметрами схем заміщення, усувається за рахунок визначення параметрів схеми по параметрам поточного режиму шляхом використання цифрового програмно-апаратного комплексу, виконаного на базі ЕОМ. Третій недолік усунутий за рахунок методики [11], в якій оцінка часткової участі проводиться за кількістю ЕЕ, розподіленої між суб'єктами з порушенням вимог до ЯЕ.

Мета статті. Аналіз методів і методик детермінованого визначення часткової участі суб'єктів у відповідальності за порушення ЯЕ по показникам синусоїдальноті кривої напруги, на можливість використання їх в локальних засобах обліку.

Виклад основного матеріалу. Для порушення синусоїдальноті кривої напруги виявлено ознаку наявності джерел струмів вищих гармонік по одну сторону границі розділу балансової приналежності, яка заснована на тому, що розкладання в ряд Фур'є несинусоїдальної кривої призводить до появи кривих вищих гармонік. Якщо джерело струмів вищих гармонік одне, то всі їх потужності мають одинаковий напрямок [12]. Саме ця особливість є ознакою наявності одного джерела струмів вищих гармонік:

$$\text{sign } P(n) = \text{const}. \quad (5)$$

Дослідження несинусоїдальноті на фізичній моделі електричної мережі [13] експериментально підтвердили критерій розташування джерела струмів вищих гармонік (5). Досліди моніторингу ЯЕ [14] показали, що наявність одного джерела генерації струмів вищих гармонік зустрічається досить часто, якщо наявність не в більшості випадків порушення синусоїдальноті напруги. Методика визначення відповідальноті за спотворення синусоїдальноті кривої напруги [15, 16] передбачає, що в разі порушення вимог до ЯЕ по синусоїдальноті за час інтервалу усереднення проводиться вимірювання потужності $P_{(n)}$ по кожній n -ї гармоніці і перевіряється виконання умови (5).

Для локального виявлення часткової участі споживача в відповідальноті за порушення синусоїдальноті кривої напруги контрольно-вимірювальний комплекс встановлюється на його фідері. Прилад здійснює контроль ЯЕ і зберігає в пам'яті інформацію про параметри режиму по кожному інтервалу усереднення, в якому було виявлено будь-яке порушення вимог ГОСТ [17] протягом проведення моніторингу. Першим завданням, яке повинна вирішити програма розрахунку відповідальноті, є відбір тих інтервалів усереднення, в яких, хоча б для однієї гармоніки, коефіцієнт n -ї гармонійної складової перевищив нормально допустиме значення:

$$K_{U_{(n)}} > K_{U_{(n)}}^{\text{н/д}}. \quad (6)$$

Для кожної гармоніки визначається напрямок активної потужності. Споживання потужності n -ї гармоніки буде в тому випадку, якщо вона збігається за напрямком з потужністю основної гармонійної складової, що можна визначити з умови:

$$P_{(n)} \cdot P_{(1)} \geq 0 \quad (7)$$

Якщо у всіх виявлених гармоніках спостерігається споживання активної потужності, то робиться висновок про те, що джерело порушення синусоїдальноті знаходитьться в системі, коефіцієнт відповідальноті споживача $K_{\text{від}} = -1$ – виконання умов (5) і (7). При генерації активної потужності всіх гармонійних складових відповідальність покладається на споживача ($K_{\text{від}} = 1$) виконання (5) і не виконання (7). Виконання умови (7) означає, що відповідальність визначається на рівні одного інтервалу усереднення, що дає детерміноване рішення.

У разі невиконання умови (5) задача розподілу відповідальноті не має математично коректного рішення в рамках одного інтервалу усереднення, при підсумуванні результатів за час моніторингу отримують наближене рішення статистичного характеру. Для інтервалу усереднення коефіцієнт відповідальності розраховується за формулою:

$$K_{\text{від}} = \sum_{n=2}^{n=40} \frac{K_{\text{від}(n)}}{k_n}, \quad (8)$$

де $K_{\text{від}(n)}$ – коефіцієнт відповідальноті n -ї гармоніки, визначений за напрямленням її активної потужності;

k_n – кількість гармонік, за якими виконано умову (6).

Гармоніки, за якими коефіцієнт n -ї гармонійної складової не перевищив нормально допустиме значення, тобто умова (6) не виконується, враховуються у формулі (8) з $K_{\text{від}(n)} = 0$.

Перевірка порушень гранично допустимих значень проводиться для тих гармонік, в яких виявлено порушення нормально допустимих значень. Порушення гранично допустимих значень визначаються умовою:

$$K_U(n) > K_U^{\text{r/d}}(n). \quad (9)$$

Перевищення коефіцієнтом спотворення синусоїдальноті кривої напруги K_U нормально і гранично допустимих значень фіксується для кожного інтервалу усереднення, виходячи з умов:

$$K_U > K_U^{\text{h/d}}, \quad (10)$$

$$K_U > K_U^{\text{r/d}}. \quad (11)$$

Участь у відповідальноті, що визначена порушенням по коефіцієнту n -ї гармонійної складової $K_{U(n)}$, поширюється і на участь в відповідальноті за порушення по коефіцієнту спотворення синусоїдальноті кривої напруги K_U .

В кожному k -му інтервалі усереднення визначається кількість ЕЕ, за яку споживач повинен отримати компенсацію, або понести штрафні санкції. Електроенергія яка споживається навантаженням враховується по фазно з коефіцієнтом відповідальноті $K_{\text{від}}$ і підсумовується по трьох фазах ($f = 3$), якщо підключення трифазне.

Енергія, отримана споживачем з порушеннями по синусоїдальноті, що вимагає визначення відповід-

альності, підсумовується за час моніторингу за всіма інтервалами усереднення:

$$W_{\text{від}} = \sum_{k=1}^{k=\frac{T}{\Delta t}} \left[\sum_{i=1}^{i=f} W(k, i) \cdot k_{\text{від}}(k, i) \right] \quad (12)$$

де T – тривалість моніторингу;

Δt – тривалість інтервалу усереднення.

Залежно від знаків коефіцієнтів відповідальноті і від величини навантаження споживача в інтервалах усереднення розрахунок по формулі (12), виконаний за час моніторингу, може дати позитивний або негативний результат. Якщо енергія, що вимагає визначення відповідальноті за порушення синусоїдальноті, позитивна ($W_{\text{від}} > 0$), то споживач повинен бути підданий штрафним санкціям, пропорційним $W_{\text{від}}$. У випадку, коли $W_{\text{від}} < 0$, споживач має право на отримання компенсації, пропорційній $W_{\text{від}}$.

Методика дозволяє визначити кількість ЕЕ, отриманої споживачем за час моніторингу з порушеннями за коефіцієнтом n -ї гармонійної складової $K_{U(n)}$, а також по коефіцієнту спотворення синусоїдальноті кривої напруги K_U . Okremо вказується кількість ЕЕ, отриманої при порушенні нормально і гранично допустимих значень. Представляється також можливість оцінювати відносну величину енергії, що вимагає визначення відповідальноті:

$$W_{\text{від}*} = \frac{W_{\text{від}}}{W}, \quad (13)$$

де W – загальна кількість електроенергії, яку споживач отримав за час моніторингу.

Методика була використана при розробці комплексної методики визначення часткової участі споживача у відповідальноті за порушення показників ЯЕ [18].

Висновки. При аналізі існуючих розробок визначення часткової участі суб'єктів у відповідальноті за порушення синусоїдальноті кривої напруги були виявлені метод і методика та алгоритм їх реалізації, які розроблені таким чином, що можуть бути використані як в централізованих, так і в локальних контролюно-вимірювальних приладах.

Список літератури

- Железко Ю.С. Влияние потребителя на качество электрической энергии в сети и технические условия на его присоединение. *Промышленная энергетика*. Москва: ЗАО НТФ «Энергопрогресс». 1991, № 8. С. 39 – 41.
- Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Щербакова П.Г. Анализ договорного подхода при определению ответственности субъектов за нарушение качества электрической энергии. *Світлотехніка та електроенергетика*. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2007, №1(9). С. 77 – 81.
- Трунова И.М., Черемисин Н.М. Совершенствование методики расчета размера компенсации потребителям некачественной электрической энергии. *Электрические сети и системы*. Київ: Редакція журналу Електричні мережі та системи. 2003, №1. С.48 – 51.
- Железко Ю.С. Присоединение потребителей к электрическим сетям общего назначения и договорные условия в части качества электроэнергии. *Промышленная энергетика*. Москва: ЗАО НТФ «Энергопрогресс». 2003. № 6. С. 42 – 50.

5. Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Сендерович П.Г. Аналіз параметрического подхода к определению ответственности субъектов за нарушение качества электрической энергии. *Світлотехніка та електроенергетика*. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2007, №2(10). С. 64 – 73.
6. Зыкин Ф.А., Коханович В.С. *Измерение и учет электрической энергии*. Москва: Энергоиздат, 1990. 104 с.
7. Зыкин Ф.А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии. *Электричество*. Москва: Энергоатомиздат. 1992, №11. С. 13 – 19.
8. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии: РД 153-34.0-15.501-01. [введен в действие от 01.08.2002]. Москва: Энергосервис, 2001. 23 с.
9. Майер В.Я., Зенина. Методика определения вкладов потребителей в ухудшение качества электроэнергии. *Электричество*. Москва: Энерготомиздат. 1994. № 9. С. 19 – 24.
10. Сендерович Г.А. Оценка влияния потребителя на искажение симметрии в точке общего присоединения. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2005, №45. С. 416 – 417.
11. Сендерович Г.А. Определение ответственности субъектов распределения электрической энергии за нарушение симметрии на сборных шинах. *Комунальне господарство міст. Сер.: Економічні науки*. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2005, Вип. 63. С. 255 – 259.
12. Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Щербакова П.Г. Особенности использования параметров режима сети для определения участия субъектов в искажении синусоидальности кривой напряжений. *Енергетика та електрифікація*. Київ: ТОВ «Технічний центр «Енергія». 2014, №10. С. 37 – 40.
13. Гриб О.Г., Довгалюк О.Н., Сендерович Г.А., Васильченко В.И., Манов И.А., Щербакова П.Г. Исследования несинусоидальности на физической модели электрической сети. *Электрические сети и системы*. Київ: Редакція журнала Електричні мережі та системи. 2011, №1. С. 46 – 50.
14. Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Довгалюк О.М., Калюжний Д.М. Оцінка якості електроенергії в сільських електрических мережах. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка Сер.: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*. Харків: ХНТУСГ, 2005, Т. 2, Вип. 37. С. 42 – 46.
15. Сендерович Г.А. Методика распределения ответственности за искажение синусоидальности в точке общего присоединения. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків: ПП «Технологічний Центр». 2005, Том 6, № 2(18). С. 139 – 143.
16. Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Сендерович П.Г. Алгоритм реализации методики распределения ответственности за искажение синусоидальности. *Комунальне господарство міст. Сер.: Економічні науки*. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2006, Вип. 67. С. 237 – 246.
17. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. [введен в действие от 01.01.2000]. Киев: Изд-во стандартов, 1998; Госстандарт Украины, с доп. и попр., 1999. 31 с.
18. Сендерович Г.А., Дяченко О.В., Захаренко Н.С., Карпалюк І.Т. Комплексна методика визначення часткової участі споживача в відповідальності за порушення показників якості електроенергії. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут*. Сер.: Гідрравлічні машини та гідроагрегати. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. №2. С. 90 – 96.
- [Lighting Engineering and Power Engineering] . Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova. 2007, №1(9). pp. 77 – 81.
3. Trunova I.M., CHeremisin N.M. Sovershenstvovanie metodiki rascheta razmera kompensacii potrebitelyam nekachestvennoj elektricheskoy energii [Improving the methodology for calculating the amount of compensation to consumers of low-quality electric energy]. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electricity grid and system]. Kyiv: Redaktsiya zhurnala Elektrychni merezhia ta sistemy. 2003, №1. pp. 48 – 51.
4. ZHelezko Y.U.S. Prisoedinenie potrebitelye k elektricheskim setyam obshchego naznacheniya i dogovornye usloviya v chasti kachestva elektroenergii [Consumer connection to general-purpose electric grids and contractual terms regarding electric power quality]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power]. Moskva: ZAO NTF «Energoprogress». 2003, № 6. pp. 42 – 50.
5. Hryb O.H., Senderovich G.A., Senderovich P.G. Analiz parametricheskogo podkhoda k opredeleniyu otvetstvennosti sub"ektor za narushenie kachestva elektricheskoy energii [Analysis of the parametric approach to determining the responsibility of subjects for violation of the quality of electric energy]. *Svitlotekhnika ta elektroenergetyka* [Lighting Engineering and Power Engineering]. Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova. 2007, №2(10). pp. 64 – 73.
6. Zykin F.A., Kohanovich V.S. Izmerenie i uchet elektricheskoy energii [Measurement and accounting of electric energy]. Moskva: Energoizdat, 1990. 104 p.
7. Zykin F.A. Opredelenie stepeni uchastiya nagruzok v snizhenii kachestva elektricheskoy energii [Determination of the degree of participation of loads in reducing the quality of electric energy]. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia]. Moskva: Energotomizdat. 1992, №11. pp. 13 – 19.
8. Metodicheskie ukazaniya po kontrolyu i analizu kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. CHast' 2. Analiz kachestva elektricheskoy energii: RD 153-34.0-15.501-01. [vveden v dejstvie ot 01.08.2002] [Procedural Guidelines for Monitoring and Analysis of Electric Power Quality in Public Electrical Networks. Part 2. Analysis of Electric Power Quality: RD 153-34.0-15.501-01 from 01.08.2002]. Moskva: Energoservis, 2001. 23 p.
9. Majer V.YA., Zeniya. Metodika opredeleniya vkladov potrebitelye v uhudshenie kachestva elektroenergii [Methodology for determining consumer contributions to the deterioration of electricity quality]. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia]. Moskva: Energotomizdat. 1994, № 9. pp. 19 – 24.
10. Senderovich G.A. Ocena vliyanija potrebitelya na iskazhenie simmetrii v tochke obshchego prisoedineniya [Assessment of consumer influence on the distortion of symmetry at the point of common connection]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». [Bulletin of the National Technical University «KhPI】. Kharkiv: NTU «KhPI», 2005, №45. pp. 416 – 417.
11. Senderovich H.A. Opredelenye otvetstvennosti sub"ektor raspredeleniya elektricheskoi enerhyy za narusheny symmetriy na sbornykh shynakh [Determining the liability of subjects of the distribution of electrical energy for breaking symmetry on busbars]. *Komunalne hospodarstvo mist. Ser.: Ekonomichni nauky* [Communal economy of cities. Series: Economic sciences]. Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova. 2005, Vyp. 63. pp. 255 – 259.
12. Grib O.G., Senderovich G.A., SHCHerbakova P.G. Osobennosti ispol'zovaniya parametrov rezhma seti dlya opredeleniya uchastiya sub"ektorov v iskazhenii sinusoidal'nosti krivoj napryazhenij [Features of the use of network mode parameters to determine the participation of subjects in the distortion of the sinusoidality of the voltage curve]. *Enerhetyka ta elektryfikatsiia* [Energy and Electrical]. Kyiv: TOV «Tekhnichnyi tsentr «Enerhiia». 2014, №10. pp. 37 – 40.
13. Grib O.G., Dovgal'yuk O.N., Senderovich G.A., Vasyl'chenko V.I., Manov I.A., SHCHerbakova P.G. Issledovaniya nesinusoidal'nosti na fizicheskoi modeli elektricheskoy seti [Studies of non-sinusoidality on a physical model of an electric network]. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electricity grid and system]. Kyiv: Redaktsiya zhurnala Elektrychni merezhia ta sistemy. 2011, №1. pp. 46 – 50.
14. Hryb O.H., Senderovich H.A., Dovhal'uk O.M., Kaliuzhnyi D.M. Otsinka yakosti elektroenerhii v silskykh elektrychnykh merezhakh [Estimation of the quality of electricity in rural electric networks]. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka Ser.: Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrayini [Journal of Kharkov National Technical University of Agriculture Petro Vasi-

References (transliterated)

- ZHelezko Y.U.S. *Vliyanie potrebitelya na kachestvo elektricheskoy energii v seti i tekhnicheskie usloviya na ego prisoedinenie* [Influence of the consumer on the quality of electric energy in the network and technical conditions for its connection]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power]. Moskva: ZAO NTF «Energopress». 1991, № 8. pp. 39 – 41.
- Hryb O.H., Senderovich H.A., Shcherbakova P.H. *Analyz dohovornoj podkhoda k opredeleniyu otvetstvennosti sub"ektorov za narusheny kachestva elektricheskoi enerhyy* [Analysis of the contractual approach to determining the liability of entities for violation of the quality of electric energy]. *Svitlotekhnika ta elektroenergetyka*

- lenko. Series: Problems of energy supply and energy saving in the agro-industrial complex of Ukraine]. Kharkiv: KhNTUSH, 2005, T. 2, Vyp. 37. pp. 42 – 46.
15. Senderovich G.A. *Metodika raspredeleniya otvetstvennosti za iskazhenie sinusoidal'nosti v tochke obshchego prisoedineniya* [Methodology for the distribution of responsibility for distortion of sinusoidality at the point of common connection]. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnologii* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. Kharkiv: PP «Tekhnolohichnyi Tsentr». 2005, Tom 6, № 2(18). pp. 139 – 143.
 16. Grib O.G., Senderovich G.A., Senderovich P.G. Algoritm realizacii metodiki raspredeleniya otvetstvennosti za iskazhenie sinusoidal'nosti [Algorithm for the implementation of the methodology for the distribution of responsibility for distortion of sinusoidality]. *Kommunalne hospodarstvo mist. Ser.: Ekonomichni nauky* [Communal economy of cities. Series: Economic sciences]. Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova. 2006. Vyp. 67. pp. 237 – 246.
 17. *Elektricheskaya energiya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya*: GOST 13109-97. [vveden v deystvie ot 01.01.2000] [Electric Energy. Power quality limits in public electrical systems: GOST 13109-97 from 01.01.2000]. Kiev: Izd-vo standartov, 1998; Gosstandart Ukrayiny, s dop. i popr., 1999. 31 p.
 18. Senderovich H.A., Diachenko O.V., Zakharenko N.S., Karpaliuk I.T. Kompleksna metodyka vyznachennia chastkovoi uchasti spozhyvacha v vidpovidalnosti za porushennia pokaznykiv yakosti elektroenerhii [Comprehensive methodology for determining the partial participation of consumers in the responsibility for violation of electricity quality indicators]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «Kharkivskyi politeknichnyi institut» Ser.: *Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty* [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Hydraulic machines and hydraulic units]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. №2. pp. 90 – 96.

Надійшла 15.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Hryb Oleh Herasymovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4758-8350>; e-mail: oleg47gryb@gmail.com

Сендерович Геннадій Аркадієвич (Сендерович Геннадий Аркадьевич, Senderovich Gennady Arkadiyevich) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5823-5692>; e-mail: sengennadii@gmail.com

Дяченко Олександр Васильович (Дяченко Александр Васильевич, Diachenko Oleksandr Vasylivych) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7232-6585>; e-mail: diachenko.a.v@ukr.net

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Игорь Тимофеевич, Karpaliuk Ihor Tymofiiovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5634-6807>; e-mail: humpway@gmail.com

Швець Сергій Вікторович (Швец Сергей Викторович, Shvets Serhii Viktorovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; e-mail: se55sh32@gmail.com

О. Ю. ЛОЗИНСЬКИЙ, Я. Ю. МАРУЩАК, В. І. МОРОЗ, Я. С. ПАРАНЧУК

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ МОДЕЛлю ЗМІНИ СТАНІВ

Розвинуто теорію представлення електричного режиму (ЕР) дугових сталеплавильних печей (ДСП) моделлю зміни станів. Уточнено граф зміни станів процесу плавлення, який враховує як особливості перебігу технологічного процесу плавлення в дугових сталеплавильних печах, так і дію регулятора положення електродів. Створено математичну модель зміни станів електричного режиму ДСП у вигляді системи диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена, яка базується на теорії Марковських процесів з дискретними станами і неперервним часом. Отримано розв'язок складної системи диференційних рівнянь у вигляді часових залежностей процесу зміни ймовірності перебування електричного режиму у різних станах та зроблено їх аналіз. Виконано дослідження впливу швидкодії системи автоматичного регулювання (САР) положення електродів на значення ймовірності станів технологічного процесу. Показано значимість практичного застосування отриманої динамічної моделі зміни станів, зокрема для комплексного поліпшення показників енергоефективності плавлення сталей в дугових сталеплавильних печах.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, електричний режим, ймовірність стану електричного режиму, Марковські випадкові процеси, інтенсивності потоків збурень і керуючих впливів.

О. Ю. ЛОЗИНСКИЙ, Я. Ю. МАРУЩАК, В. И. МОРОЗ, Я. С. ПАРАНЧУК

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ МОДЕЛЬЮ СМЕНЫ СОСТОЯНИЙ

Развито теорию представления электрического режима дуговых сталеплавильных печей (ДСП) моделью смены состояний. Получено уточненный график изменения состояний процесса плавления, учитывающий как особенности протекания технологического процесса плавления в дуговых печах, так и действие регулятора положения электродов. Создана математическая модель изменения состояний электрического режима ДСП в виде системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, основанная на теории Марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем. Получено решение сложной системы дифференциальных уравнений в виде временных зависимостей процесса изменения вероятностей пребывания электрического режима в разных состояниях и проведен их анализ. Выполнено исследование влияния быстродействия системы автоматического регулирования (САР) положения электродов на значение вероятности состояний электрического режима. Показана практическая значимость использования полученной динамической модели изменения состояний, в частности для комплексного улучшения показателей энергоефективности плавления сталей в дуговых сталеплавильных печах.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрический режим, вероятность состояния электрического режима, Марковские случайные процессы, интенсивности потоков возмущений и управляющих воздействий.

O. Y. LOZYN SKYI, Y. Y. MARUSHCHAK, V. I. MOROZ, Y. S. PARANCHUK

TECHNOLOGICAL PECULIARITIES OF THE STEEL-MELTING FURNACE ELECTRIC MODE REPRESENTATION BY STATE CHANGE MODEL

The theory of the arc furnaces (AF) electric mode (EM) representation using the state change model is developed. The graph of changes of the melting process states, which takes into account both the peculiarities of the melting process flow in arc furnaces and the action of the electrodes position regulator, is specified. A mathematical model of the AF EM states change in the form of a Kolmogorov-Chapman differential equations system is created, which is based on the theory of Markov processes with discrete states and continuous time. The solution of a complex differential equations system in the form of the process of the probability change time dependencies of the electric mode presence in different states is obtained and their analysis is done. The study of the influence of the electrodes position automatic control system (ACS) speed on the value of the technological process states probability is fulfilled. The significance of the practical application of the obtained dynamic state change model is shown, in particular for the complex improvement of energy efficiency indices of steels melting in arc steelmaking furnaces.

Key words: arc furnace, electric mode, probability of electric mode state, Markov random processes, intensity of perturbation flows and control influences

Вступ. Дугові сталеплавильні печі – це потужні електротехнологічні установки, що відносяться до класу складних систем і характеризуються випадковим характером навантаження та параметричними збурень у дугових проміжках та силовому колі живлення трифазних дуг. Вказані характеристики навантаження ускладнюють процес керування такими об'єктами та накладають відповідні обмеження на системотехніку – моделі, методи та підходи для удосконалення існуючих систем керування режимами та регулювання електрических координат.

Метою даної роботи є розвити теорію представлення електричного режиму ДСП моделлю зміни станів, зокрема створити уточнений граф зміни станів системи регулювання електричного режиму, який вра-

ховував би особливості технологічного процесу плавлення з використанням регулятора переміщення електродів, та саму математичну модель динаміки зміни станів електричного режиму.

Проблема комплексного покращання показників енергоефективності та електромагнітної сумісності дугових печей диктується необхідністю підвищення конкурентоспроможності електросталей та високолегованих сплавів на внутрішньому та зовнішньому ринку металопродукції. Її стан в значній мірі визначається рівнем досконалості системи керування, що в свою чергу визначається прийняттям моделлю її синтезу.

Зрозуміло, що для таких електротехнологічних стохастичних об'єктів найдоцільніше використовувати моделі, які базуються на ймовірнісних характеристи-

ках процесів збурень, тобто найповніше відповідають природі процесів, які протікають в ДСП.

Аналіз відомих рішень. Вперше задача представлення електричного режиму ДСП моделлю зміни станів розв'язана в роботі [1], де запропоновано методику розрахунку часових значень ймовірностей цих станів, яка базується на представленні процесів зміни станів Марковською моделлю випадкових процесів з дискретними станами і неперервним часом.

Стан електричного режиму в кожній фазі ДСП згідно з [1] ідентифікується значенням струму дуги, яке може бути заданим діапазоном незначних відхилень для даної технологічної стадії плавлення, може знаходитися в зоні директивних відхилень (раціональні електричні режими), або може попадати в зону екстремальних (критичних, аварійних) відхилень. Прийнявши, що система переходить зі стану в стан під дією пуссонівських потоків подій, введемо поняття інтенсивностей потоків збурень, а також інтенсивностей потоків керуючих впливів, що дасть змогу сформувати для опису зміни ймовірностей станів електричного режиму ДСП систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена і внаслідок її розв'язку отримати часові залежності зміни ймовірностей станів електричного режиму.

Аналізуючи графіки зміни в часі ймовірностей станів електричного режиму ДСП можна вибрати потрібну інтенсивність потоку керуючих впливів, який забезпечує знаходження ЕР в заданому стані при дії відповідного потоку збурень.

Роботами, які для синтезу керуючих впливів в дугових сталеплавильних печах використовують ймовірнісні моделі процесів в таких об'єктах, слід признати праці [2, 3]. Проте це статті, в яких або за критерій функціонування системи приймають моментні функції різних координат, або синтезуються процеси керуючих впливів на основі спектральних характеристик таких координат.

В згаданій роботі [1] розроблено основні аспекти керування ЕР ДСП з метою забезпечення його знаходження в заданому стані з максимальною ймовірністю. Граф станів динамічної системи регулювання електричного режиму ДСП, представлений в цій роботі, показано на рис. 1.

На цьому рисунку стан X_1 характеризує заданий електричний режим ДСП; стан X_2 характеризується директивними відхиленнями електричного режиму від заданого значення; стан X_3 характеризується екстремальними (аварійними) відхиленнями електрично-

го режиму. У стан X_3 система може переходити як у наслідок виникнення коротких замикань, так і обривів дуги. Тут потрібно відзначити, що такий граф станів не враховує технологічних особливостей стану X_3 .

Виклад основного матеріалу. Для найбільш загального випадку представимо модель зміни станів електричного режиму графом рис. 2.

На цьому рисунку стан X_3 з рис. 1 характеризується екстремальними відхиленнями ЕР і на рис. 2 він представлений двома станами: станом X_3 , який характеризується відхиленням електричного режиму за рахунок технологічного короткого замикання; станом X_4 , який характеризується відхиленням електричного режиму за рахунок технологічного обриву дуги.

Таке представлення відповідає умовам регулювання електричного режиму ДСП електрогідрравлічними чи електромеханічними регуляторами потужності дуг. Щоб ліквідувати обрив дуги, потрібно спочатку її запалити, тобто торкнутися електродом(и) шихти, тобто спричинити експлуатаційне коротке замикання, а потім розтягувати дугу до заданої довжини.

Таким чином, кожен стан електричного режиму у процесі плавлення в дуговій печі може змінюватися під дією двох потоків впливів – потоку збурень, які діють в плавильному просторі дугової сталеплавильної печі і які виводять електричний режим із заданого стану, і потоку керуючих впливів, які є реакцією системи регулювання довжин дуг з метою усунення відхилень координат електричного режиму від директивно заданих.

Збурення електричного режиму за причини дії випадкових змін довжин дуг відбувається миттєво і тому $\lambda_{ij}(t) = \lambda_{ij}$, тобто інтенсивності збурень не залежать від часу. Значення інтенсивностей таких збурень може змінюватися лише за рахунок перебігу режиму в іншу технологічну стадію, які характеризуються різними амплітудними та частотними параметрами спектральної густини збурень. Ми ж в цій роботі розглядаємо зміну станів електричного режиму упродовж однієї конкретної технологічної стадії плавлення сталі, наприклад технологічної стадії проплавлювання колодязів в твердій шихті. Також, як показують приведені в роботі [4] результати дослідження, постійними для конкретної стадії можна прийняти і інтенсивності реакцій системи регулювання положення електродів.

З урахуванням сказаного, система рівнянь Колмогорова-Чепмена для динаміки зміни ймовірностей станів електричного режиму прийме вигляд:

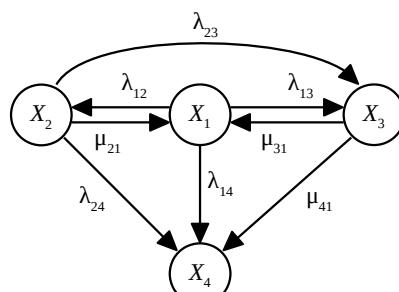


Рис. 2. Модель зміни станів електричного режиму дугової печі у процесі електросталеплавлення

Рис. 1. Граф станів динамічної системи регулювання електричного режиму ДСП

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) P_1(t) + \mu_{21} \cdot P_2(t) + \mu_{31} \cdot P_3(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(\lambda_{23} + \lambda_{24} + \mu_{21}) \cdot P_2(t) + \lambda_{12} \cdot P_1(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= -\mu_{31} \cdot P_3(t) + \lambda_{13} \cdot P_1(t) + \lambda_{23} \cdot P_2(t) + \mu_{43} \cdot P_4(t); \quad (1) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= -\mu_{43} \cdot P_4(t) + \lambda_{14} \cdot P_1(t) + \lambda_{24} \cdot P_2(t); \\ P_3(0) &= 1. \end{aligned}$$

де $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$ – ймовірності перебування технологічного процесу у відповідному стані.

Традиційно у рівняннях Колмогорова-Чепмена початкові умови першого стану приймаються рівними одиниці, а всі решта – нульові. Для технологічного процесу плавлення сталей в дугових печах вказане вище твердження не справджується. Особливістю динаміки ЕР ДСП є те, що запалювання дуг, а значить початок технологічного процесу плавлення, починається з режиму короткого замикання. Тому для стану X_3 (рис. 2) $P_3(0) = 1$, а всі інші початкові умови станів ЕР будуть нульовими.

Крім цього, зазначимо, що традиційно рівняння Колмогорова-Чепмена стосуються графу станів, які мають таку властивість, що права частина будь-якого рівняння може бути отримана як лінійна комбінація правих частин решти рівнянь. Щоб усунути проблему лінійної залежності системи рівнянь традиційно усувають із розгляду будь-яке рівняння, замінюючи його рівнянням повної групи подій.

Як видно із записаної вище системи рівнянь Колмогорова-Чепмена (1) для процесу плавлення в дуговій печі, права частина таких рівнянь не є лінійною залежністю. Тому для визначення часових залежностей $P_i(t)$, числово розв'яземо отриману систему диференційних рівнянь (1) для певних значень інтенсивностей переходів з урахуванням вказаних вище значень початкових умов.

Так, на основі аналізу процесу електросталеплавлення в ДСП-100 НЗА на технологічному період проплавлювання колодязів, встановлено, що інтенсивності переходів, що зумовлені збуренням електричного режиму, мають наступні значення: $\lambda_{12} = 10,29 \text{ c}^{-1}$; $\lambda_{13} = 4,5 \text{ c}^{-1}$; $\lambda_{23} = 6,86 \text{ c}^{-1}$; $\lambda_{14} = 2 \text{ c}^{-1}$; $\lambda_{24} = 2,3 \text{ c}^{-1}$.

Фізично інтенсивність «відновлення» μ характеризує швидкодію роботи САР положення електродів, а тому приймається однаковою для всіх станів і становить $\mu = 3 \text{ c}^{-1}$.

Для наведених вище значень параметрів системи диференційних рівнянь (1) шляхом її числового інтегрування отримано динамічні процеси (часові залежності) зміни ймовірностей перебування електротехнічної системи – електричного режиму дугової печі типу ДСП-100 НЗА на період проплавлювання колодязів у твердій шихті, у різних станах (стани згідно рис. 2), які показано на рис. 3.

Як видно з отриманих часових залежностей динаміки зміни станів, переход в зону усталених значень ймовірностей станів відбувається упродовж однієї секунди.

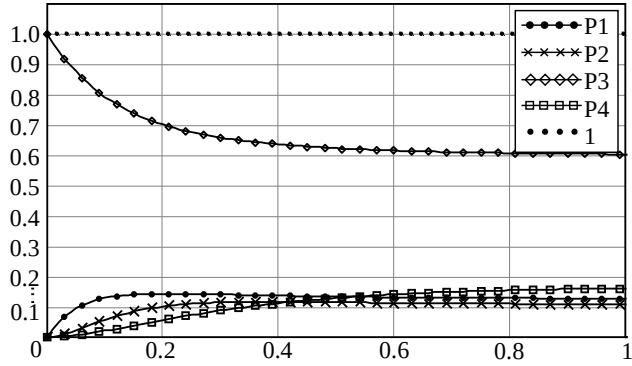


Рис. 3. Часові залежності зміни ймовірностей станів електричного режиму для ($\mu = 3 \text{ c}^{-1}$)

Крім цього виявилось, що і в динамічному і в усталеному режимі сума всіх чотирьох ймовірностей дорівнювала одиниці. Це означає, що розглядувані стани утворюють повну групу подій. Отож, наведені часові залежності – розв'язки системи (1), підтвердили правомірність представлення процесу плавлення в ДСП графом, представленим на рис. 2, і використання відповідної системи диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена без порушення представлення реальних фізичних процесів під час плину технологічного процесу плавлення сталі в ДСП-100 НЗА. Адже при створенні математичної моделі (1) не закладалася умова наявності повної групи подій, що подаються розглядуваними стадіями. У результаті числового інтегрування системи (1) виявилось, що ця умова виконується, а це значить, що вибір всіх можливих станів електричного режиму здійснено коректно.

З іншого боку, з'явилася можливість замінити будь-яке диференціальне рівняння в системі рівнянь (1) на алгебричне рівняння $\sum P_i(t)$, що визначається умовою повної групи подій. Тим самим, знайдено підтвердження традиційної методики запису рівнянь Колмогорова-Чепмена із нормувальним рівнянням для технологічного процесу. Виглядає так, що це одне й теж, але причиною введення рівняння $\sum P_i(t)$ в математичну модель технологічного процесу не є лінійною залежністю виразі правих частин рівнянь Колмогорова-Чепмена, а спрощення математичного опису графу станів технологічного процесу плавлення.

Використовуючи створену математичну модель (1) графу станів (рис. 2), було також проведено дослідження впливу швидкодії системи регулювання положення електродів дугової сталеплавильної печі на динаміку процесу зміни ймовірності станів технологічного процесу (прийнято $\mu = 6 \text{ c}^{-1}$).

Аналіз наведених на рис. 4 часових залежностей зміни ймовірностей станів показує, що має місце значний вплив швидкодії μ системи регулювання положення електродів дугової печі на динаміку зміни ймовірностей станів $P_1(t)$ і $P_3(t)$. Зростання швидкодії САР ЕР ДСП призводить до збільшення ймовірності перебування системи в бажаному стані $P_1(t)$ і зниження $P_3(t)$.

Тут потрібно зазначити, що ймовірність стану $P_3(t)$ все ж залишається дещо вищою за інші ймовірності.

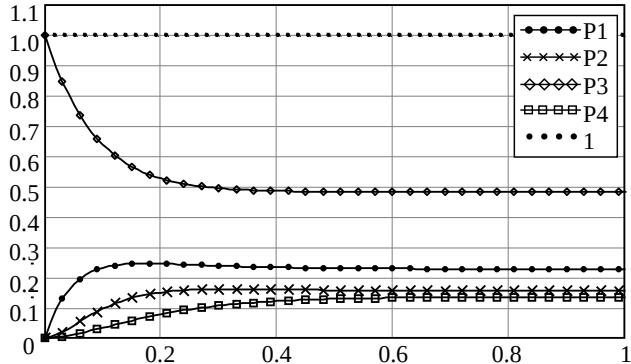


Рис. 4. Часові залежності зміни ймовірностей станів електричного режиму для $\mu = 6 \text{ с}^{-1}$

Це можна пояснити тим, що даний стан визначається не одним, а двома факторами:

а) станом експлуатаційного короткого замикання, у який цілеспрямовано переводиться електричний режим системи автоматичного регулювання у процесі усунення (відпрацювання) обриву дуги;

б) станом короткого замикання, що виникає внаслідок дії екстремального випадкового збурення за довжиною дуги у тому чи іншому дуговому проміжку.

У тож же час всі інші стани обумовлені тільки збуреннями за довжинами дуг у дугових проміжках кожної фази.

Висновки. 1. Опрацьована в статті математична модель зміни станів електричного режиму дугової сталеплавильної печі, яка базується на теорії Марковських процесів з дискретними станами і неперервним часом, на відміну від існуючих моделей опису станів враховує технологічні особливості процесу електросталеплавлення дугових печах.

2. Отримана модель дає змогу виконувати комп'ютерні дослідження впливу на показники динаміки процесів зміни ймовірностей станів електричного режиму у різних технологічних стадіях параметрів регуляторів потужності дуг дугових сталеплавильних печей.

3. Практична значимість опрацьованої математичної моделі зміни станів електричного режиму ДСП полягає в можливості отримання за результатами математичних експериментів бажаних значень інтенсивності реакцій регуляторів потужності дуг, реалізація яких даст змогу комплексно поліпшити низку показ-

ників енергоефективності плавлення сталей в дугових сталеплавильних печах, на що будуть скеровані подальші дослідження авторів.

Список літератури

1. Lozynskyi O., Lozynskyi A., Paranchuk Y. Representation of electrical mode in arc furnaces by a state change model and determination of the possibilities of these states. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2018. Vol. 8, №1. pp. 26 – 30.
2. Лозинський О.Ю., Марушак Я.Ю. Тривимірна стохастична модель системи регулювання електричного режиму дугової сталеплавильної печі. *Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні*. Львів: Світ, 1993, Вип. 31. С. 7 – 11.
3. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О. Оптимізація динамічних режимів взаємозалежних електромеханічних систем. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Сер.: Електроенергетичні та електромеханічні системи. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2001, № 421. С. 98 – 103.
4. Соколов М.М., Грасевич В.Н. *Электрооборудование механизмов электротермических установок*: учебное пособие для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

References (transliterated)

1. Lozynskyi O., Lozynskyi A., Paranchuk Y. Representation of electrical mode in arc furnaces by a state change model and determination of the possibilities of these states. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2018. Vol. 8, №1. pp. 26 – 30.
2. Lozynskyi O.Iu., Marushchak Ya.Iu. Tryvymirna stokhastichna model systemy rehulyuvannia elektrychnoho rezhymu duhovoї staleplavylnoi pechi [Three-dimensional stochastic model of the electric mode regulation of an arc furnace] *Avtomatyzatsiia vyrabnychych protsesiv v mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni* [Industrial Process Automation in Engineering and Instrumentation]. Lviv: Svit, 1993, Vyp. 31. pp 7 – 11.
3. Lozynskyi O.Iu., Paranchuk Ya.S., Lozynskyi A.O. Optymizatsiya dynamichnykh rezhimiv vzaimozalezhnykh elektromekhanichnykh system [Optimization of dynamic regimes of interconnected electromechanical systems]. Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Ser.: Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Electric Power and Electromechanical Systems]. Lviv: NU «Lvivska politekhnika», 2001, № 421. pp. 98 – 103.
4. Sokolov M.M., Grasevich V.N. *Elektrooborudovanie mekhanizmov elektrotermicheskikh ustanonovok*: uchebnoe posobie dlya vuzov [Electrical equipment of the mechanisms of electrothermal plants: university textbook]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 320 p.

Надійшла 15.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лозинський Орест (Лозинский Орест, Lozynskyi Orest) – Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем; м. Львів, Україна; Orcid ID: 0000-0002-4943-8746, e-mail: orest.y.lozynskyi@lpnu.ua

Марущак Ярослав (Марущак Ярослав, Marushchak Yaroslav) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем; м. Львів, Україна; Orcid ID: 0000-0002-7901-3343, e-mail: ya.marushchak@gmail.com

Мороз Володимир (Мороз Володимир, Moroz Volodymyr) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем; м. Львів, Україна; Orcid ID: 0000-0001-7130-3525; e-mail: volodymyr.i.moroz@lpnu.ua

Паранчук Ярослав (Паранчук Ярослав, Paranchuk Yaroslav) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем; м. Львів, Україна; Orcid ID: 0000-0002-8400-1267, e-mail: yparanchuk@yahoo.com

M. MUKHA, A. DRANKOVA, I. KRASOVSKYI

THE EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR THE STUDY AND RESEARCH OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS ENERGY-EFFICIENT MODES

A modern variable frequency drive (VFD) is becoming an integral part of ship systems and complexes, where energy-efficient and resource-saving technologies are widely used. Therefore, the study and research of such electric drives for various applications with a typical load of ship mechanisms is an actual task. This paper presents an experimental setup designed to study and test methods and laws of VFD control, evaluate power quality indicators and energy-efficient modes of an electromechanical systems operation with a typical ship load. Used unit for measuring parameters (124 parameters) of electricity ME96SS ver. A, through MODBUS® RTU and the corresponding software for data collection, EMU4-SW1 allows you to display and record data in real time, and then present the results in the form of tables, graphs, etc. FR-Configurator 2 software of parameterization and adjustment allows to explore the various laws of controlling of ship mechanisms and systems. The typical nature of the loads for the studied motor for such mechanisms is simulated by a load DC generator, in the anchor circuit of which the steps of the resistors are switched as a function of speed (speed sensor signal) using a programmable controller. The proposed experimental setup, the available hardware and software testing, commissioning and diagnostics tools allow to develop and implement energy-saving technologies in ship's electromechanical systems, improve the methods of their technical operation based on the analysis of the technical condition. Used experimental research methods, modern energy-saving technologies are of great importance for the educational process.

Keywords: experimental installation, electromechanical system, study and research of energy-saving modes, variable frequency drive, hardware and software tools.

М. Й. МУХА, А. О. ДРАНКОВА, І. І. КРАСОВСЬКИЙ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Сучасний частотно-регульований привод (ЧРП) стає невід'ємною частиною суднових систем і комплексів, де широко використовуються енергозберігаючі та ресурсозберігаючі технології. Тому вивчення і дослідження таких електроприводів різного призначення з типовим навантаженням суднових механізмів є актуальним завданням. У даній роботі представлена експериментальна установка, яка призначена для вивчення і тестування методів і законів управління ЧРП, оцінки показників якості електроенергії та енергоефективних режимів роботи електромеханічних систем з типовим судновим навантаженням. Використовуваний блок вимірювання параметрів (124 параметри) електроенергії ME96SS ver. A, через MODBUS® RTU і відповідне ПО для збору даних EMU4-SW1 дозволяє в режимі реального часу відображати і записувати дані, а потім представляти результати у вигляді таблиць, графіків і т.п. ПО параметрування і налагодження частотних перетворювачів FR-Configurator 2 дозволяє досліджувати різні закони управління судновими механізмами і комплексами. Типовий характер навантажень для досліджуваного асинхронного двигуна для таких механізмів імітується навантажувальним генератором постійного струму, в якірному колі якого комутуються ступені резисторів в функції частоти обертання (сигналу датчика швидкості) за допомогою програмованого контролера. Запропонована експериментальна установка, наявні апаратно-програмні засоби тестування, налагодження та діагностики дозволяють розробляти і впроваджувати енергозберігаючі технології в суднові електромеханічні системи, удосконалювати методи їх технічної експлуатації на основі аналізу технічного стану. Використовувані експериментальні методи досліджень, сучасні енергозберігаючі технології мають велике значення для навчального процесу.

Ключові слова: експериментальна установка, електромеханічна система, вивчення і тестування енергозберігаючих режимів, частотно-регульований привод, апаратно-програмні засоби.

Н. И. МУХА, А. О. ДРАНКОВА, И. И. КРАСОВСКИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современный частотно-регулируемый привод (ЧРП) становится неотъемлемой частью судовых систем и комплексов, где широко используются энергосберегающие и ресурсосберегающие технологии. Поэтому изучение и исследование таких электроприводов различного назначения с типичной нагрузкой судовых механизмов является актуальной задачей. В данной работе представлена экспериментальная установка, предназначенная для изучения и тестирования методов и законов управления ЧРП, оценки показателей качества электроэнергии и энергоэффективных режимов работы электромеханических систем с типовой судовой нагрузкой. Используемый блок измерения параметров (124 параметра) электроэнергии ME96SS ver. A, через MODBUS® RTU и соответствующее ПО для сбора данных EMU4-SW1 позволяет в режиме реального времени отображать и записывать данные, а затем представлять результаты в виде таблиц, графиков и т.п. ПО параметрирования и наладки частотных преобразователей FR-Configurator 2 позволяет исследовать различные законы управления судовыми механизмами и комплексами. Типовой характер нагрузок для исследуемого АД для таких механизмов имитируется нагрузочным генератором постоянного тока, в якорной цепи которого коммутируются ступени резисторов в функции частоты вращения (сигнала датчика скорости) с помощью программируемого контроллера. Предложенная экспериментальная установка, имеющиеся аппаратно-программные средства тестирования, наладки и диагностики позволяют разрабатывать и внедрять энергосберегающие технологии в судовые электромеханические системы, совершенствовать методы их технической эксплуатации на основе анализа технического состояния. Используемые экспериментальные методы исследований, современные энергосберегающие технологии имеют большое значение для учебного процесса.

Ключевые слова: экспериментальная установка, электромеханическая система, изучение и исследование энергосберегающих режимов, частотно-регулируемый привод, аппаратно-программные средства.

Introduction. The marine fleet provides most of the transportation for the global market of goods and raw materials. Reducing energy costs per unit of cargo by increasing the energy efficiency of marine vessels allows,

on the one hand, lowering the cost of shipping, and on the other hand, prevents air pollution from ships and provides to reduce the amount of emissions into the atmosphere.

© M. Mukha, A. Drankova, I. Krasovskyi, 2020

Reducing operating costs is one of the main concerns of the shipping industry today. The requirement that vessels must obtain an international certificate of energy efficiency establishes new rules for managing the vessel's energy efficiency and ways to reduce energy consumption on water transport.

Therefore, the development of an energy-efficient strategy for the operation of sea and river transport is a priority and relevant investigation. In our opinion, the effectiveness of the vessel should be a part of the design and construction criteria for ships.

Problem analysis. At Present in the ship's complex "generation - consumption of electricity" the potential for improving energy efficiency was used only to a small extent. The specificity of improving energy efficiency in this complex is the significant saving of primary fuel resources by reducing power consumption.

One of the ways to increase the energy efficiency of ship operation and reduce energy consumption is to develop methods for managing electricity flows. Unwanted losses occur in the generation, distribution, transformation and use of electricity in a ship's autonomous electricity system.

In addition, ship consumers of electricity are mainly active-inductive load, i.e. the total current of generators, transformers and cable lines should increase in relation to the required active load by a value that is inversely proportional to the value of the power factor, which is proportionally to the increase electrical consumers. Therefore, generating installations must provide additional jet power, which in turn reduces their efficiency due to the increased fuel consumption of the prime move drives.

Thus, as mentioned earlier, one of the ways to increase the energy efficiency of the ship's operation and reduce the power consumption along with improving the operation modes of the ship's propulsion and optimizing the operation of an auxiliary equipment and mechanisms is a develop rational methods of managing electrical energy flows of the shipboard power plant.

In our opinion, there are two ways to solve this problem. This determines two areas of research into this problem: 1) optimal control of the electrical energy flow at the stage of its generation and distribution; 2) optimization of energy flows at the consumption stage, i.e. at the stage of electromechanical electricity conversion. The main research results associated with the 1-st area presented in our papers [1, 2]. The biggest benefit of designing a new-build in a more energy efficient way is the potential for reducing the size of the shipboard power plant, which can operate with power factor close to unity.

The problem of increasing the energy efficiency of ship generation systems is urgent and rather complicated due to the restrictions due to the laws of physics.

Based on the given values of the generating plants efficiency [3], we can conclude that saving one unit of electricity at the consumption stage allows saving up to five units of conventional primary fuel.

Therefore, in our opinion, the 2-nd strategic direction of research, which is associated with a more efficient use of electrical energy, is reasonably arguable.

Moreover, if you keep in mind that the component of the total generated energy, which converted using vessel's electromechanical systems, is more than 90%.

Thus, the introduction of energy-efficient electro-mechanical systems has the potential to reduce electricity consumption by more than 10-15% of the total generated and is one of the priority areas for increasing the vessel's energy efficiency.

A modern variable frequency drive (VFD) is becoming an integral part of ship systems and complexes [4], where energy-efficient and resource-saving technologies are widely used. Therefore, the study and research of such electric drives for various applications with a typical load of ship mechanisms is an actual task.

The aim of this work is to create a laboratory installation for studying and testing a control laws, evaluating the energy parameters of an adjustable electric drive of ship's electromechanical systems with a typical load.

Research materials. In Fig.1 presented the laboratory setup for the study and research of control laws, indicators of the electric energy quality and assessment an energy efficiency of asynchronous electric drives with frequency converters FR-F840, FR-A740 and voltage converter (soft starter) of type RVS-DN-8-400.



Fig. 1 – Voltage and frequency converters with asynchronous motors aggregate: 1 – Digital Voltage Soft Starter; 2 – Electronic Multimeasuring Instrument ME96SSRA-MB; 3 – Frequency Converter FR-A740; 4 – Frequency Converter FR-F840; 5 – Current Transformers; 6 – Two-machine Aggregate with 1.5 kW Asynchronous Machines

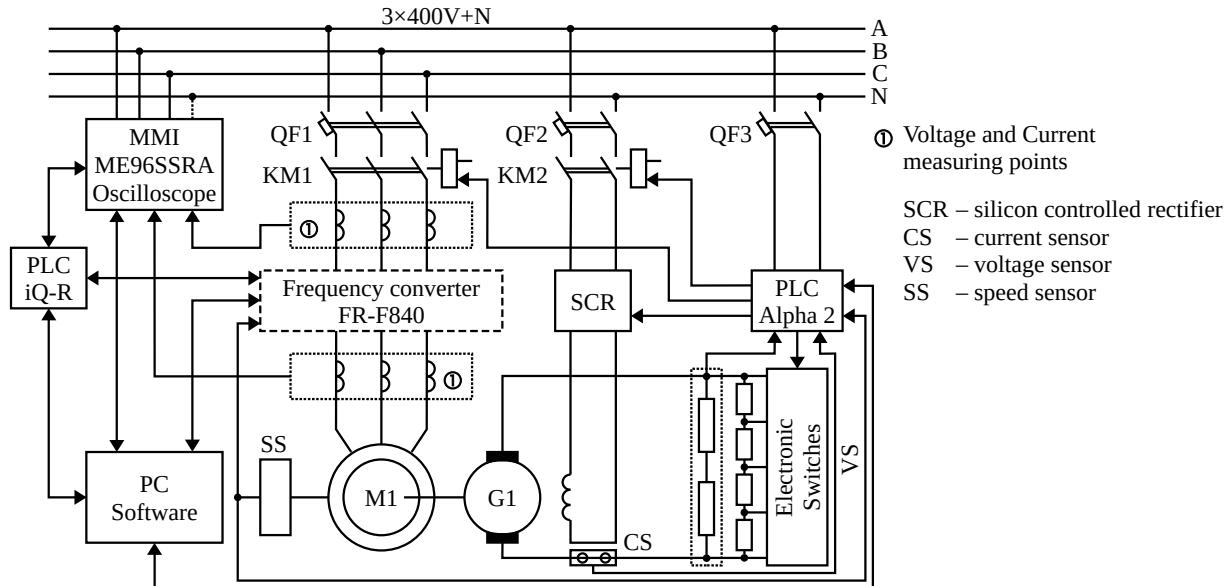


Fig. 2 - Functional diagram of an experimental installation of the electromechanical system with VFD

The functional diagram of the VFD research complex shown in Fig. 2. The measuring equipment of the laboratory complex is a good tool for research work, and the available software provides convenient opportunities for receiving and presenting research results.

The MMI block consists with an electronic multi-measuring instrument ME96SSRA-MB (ME96SS – A Ver.) and an oscilloscope ExtechMS420, which measure and record electrical energy parameters, power quality indicators and their time and phase dependencies. We are used this Energy Measuring Unit ME96SS Ver. A series unit with MODBUS® RTU (using RS-485 - USB conversion adapter) and corresponding Data Acquisition Software EMU4-SW1 for remote real-time monitoring system of an electrical energy parameters.

Data acquisition function can acquire the data from measuring terminals at constant intervals: 1 minute or 1 hour. In the “Report output” function, is create, for example, a detailed report by pasting the data measured at any constant interval to the master file (Excel file). Measured parameter's values are updated one-second intervals at shortest and save it as CSV file. The result file of data acquisition is stored in the user folder.

Data Sheet for ME96SSRA-MB is shown in table below. In Fig. 3 is shown the connection diagram of the device ME96SSRA-MB for measuring the electricity parameters. Using the ME96SSRA-MB instrument it is possible to measure the input power source parameters of the converter and the load parameters [11, 12] (at the converter output) by entering the measured values from the secondary windings of voltage transformers and current transformers and display the values of these measurements. Measuring type: instantaneous or integration value. Measuring elements are phase or linear currents, phase or linear voltages, active power, reactive power, apparent power, power factor and frequency.

In addition, it can measure harmonics (current and voltage) [10] and count active energy (imported and exported) and reactive energy (imported lag, imported lead

Measuring Items	ME96SSRA-MB
Current (A)	$\pm 0.2\%$
Demand Current (DA)	
Voltage (V)	$\pm 0.2\%$
Active Power (W)	$\pm 0.5\%$
Reactive Power (var)	$\pm 0.5\%$
Apparent Power (VA)	$\pm 0.5\%$
Power Factor (PF)	$\pm 0.5\%$
Frequency (Hz)	$\pm 0.1\%$
Active Energy (Wh) (IEC62053-21,22)	Class 0.5S (Import/Export)
Reactive Energy (varh)	Class 1S
Apparent Energy (VAh)	$\pm 2.0\%$
Harmonics Current (HI)	Max.19th, $\pm 1.0\%$
Harmonics Voltage (HV)	Max.19th, $\pm 1.0\%$

angle, exported lag, exported lead angle).

It can expand the remote input/output function to the ModBus RTU communication, that is provide for visualization on HMI (GOT). This allow to efficiently operate, monitor and control of an investigational processes. GOTs can be seamlessly integrated to other Mitsubishi Electric devices like PLCs, inverters, or motion systems for a total automation and studying solution [5-7].

Simulation of the typical load of asynchronous electric drives was performed with the help of load-type direct-current (DC) generators, which are connected by a coupling with an asynchronous electric motor. The load of the generators, in turn, varies or discretely from idling to 1.25 of the generators rated current with a constant excitation of the generator or smoothly while regulating the excitation voltage of the generator (see Fig. 2).

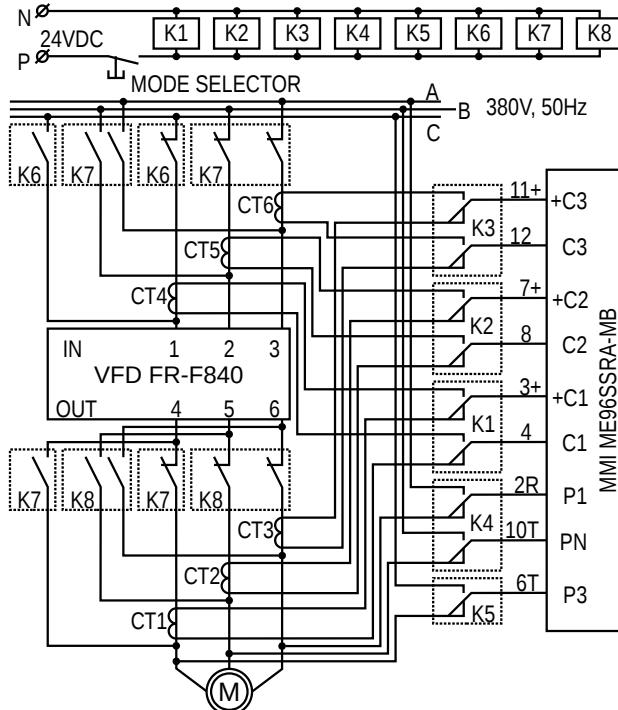


Fig. 3. The connection diagram of the ME96SSRA-MB device

The law of the load torque changing on the motor shaft can be formed by means a PLC in automatic mode as a function of changing the speed of the motor shaft (analog feedback signal from the speed sensor, which is fed to the PLC input, see fig. 2). Typical mechanical characteristics of ship mechanisms (fans, centrifugal pumps, lifting mechanisms, conveyors, etc.) are preprogrammed for the PLC. These laws are determining an algorithm for connecting the corresponding resistors to the armature circuit of the generator.

Schematic diagram of the speed sensor for the automatic mode of the load torque formation of typical ship mechanisms is shown in Fig. 4.

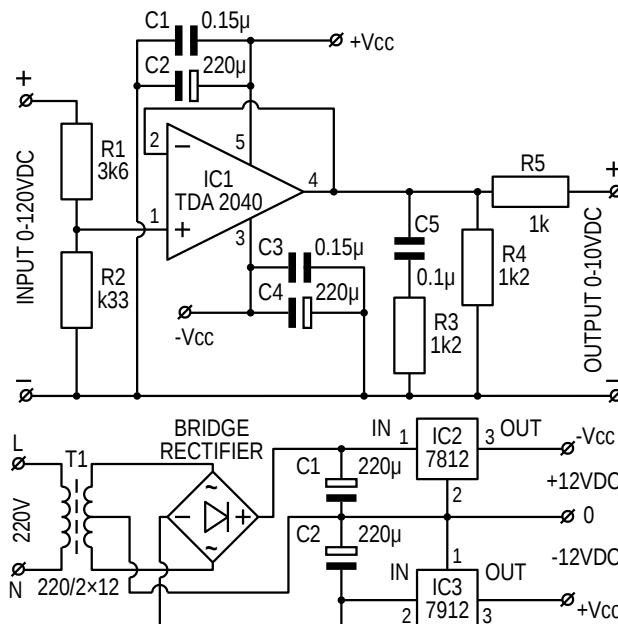


Fig. 4. Speed sensor for PLC-controlled load

Conclusions.

The developed experimental setup allows us to study and test various operation modes of the shipboard electro-mechanical systems based on a frequency-controlled electric drive [3]. VFD control laws, indicators of the electric energy quality and assessed the modes an energy-efficiently electromechanical systems with typical ship's load can be investigated with the help of mentioned equipment.

A short list of the main tasks which can be solved with the help of laboratory equipment:

Development and implementation of energy-saving technologies in the control system of a marine electric drive based on diagnostics and determination of their energy characteristics [8, 12] using the theory of instant power.

Development of monitoring and evaluation systems for the operational life of electrical machines.

Development of methods for the technical operation of ship electromechanical systems based on an analysis of their technical condition.

The use of modern energy-saving technologies used on ships, on the examples of frequency-controlled electric drives of various ship mechanisms and systems for educational process.

In finally, it should be noted that modern higher education should be aimed at teaching students in accordance with the constantly updated technical base and with the growing needs of employers. In order to meet these objectives, it is necessary to introduce new technologies in the process of education and training of specialists, which not only helps to increase the level of training, but also to orient the educational process to the real problems of maintenance, parameterization of modern shipboard electro-mechanical systems with PLC control.

References

- Муха М.Й. Динамічна компенсація реактивної потужності у суднових автономних електроенергетичних системах: монографія. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 381 с. ISBN: 978-613-9-99561-5.
- Mukha M. A Full Mission Simulator of the Ship's Automated Electric Power System for Training and Competence Testing of Marine Engineers. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*. 2017. Vol. 4. pp. 153 – 160. doi 10.17265/2159-5879/2017.04.002.
- Зарінняк М.В., Клепіков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М., Садовой О.В., Шаповал І.А. Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення: монографія. Київ: ІЕД НАНУ, 2018. 310 с. ISBN 978-966-02-8403-6.
- Jan-Erik Rasanen, Eric W Schreiber. Using Variable Frequency Drives (VFD) to save energy and reduce emissions in newbuilds and existing ships. *Energy efficient solutions*. London: Lloyd's Maritime Academy, ABB, 2012. 11 p.
- Drankova A., Mukha M., Mikhaykov S., Krasovskyi I. Electro-mechanical Laboratory Complex for Power Quality Studies of the Ship Electrical System. *IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Lviv-Slavskie: Lviv Polytechnic National University, Ukraine, 15-18 September, 2019. PS2, N15. doi: 10.1109/CPEE47179.2019.8949147.
- Mukha M., Drankova A. About practical preparation of marine engineers on the electromechanical systems laboratory. *Computational problems of electrical engineering*. 2018. Vol. 8, №2, pp. 66 – 72.
- Mukha M., Drankova A., Bousher V., Shestaka A. PLC-based ship's electromechanical systems laboratory. *Proceedings of the 13th International Conference on the Engine Room Simulators*. Odessa:

- National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine, 20-21 September, 2017. pp. 183 – 190.
8. Загірняк М.В., Мамчур Д.Г., Калінов А.П., Чумачова А.В. *Діагностика асинхронних двигунів на основі аналізу сигналу споживаної потужності: монографія*. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2013. 208 с. ISBN 978-617-639-037-4.
 9. Петрушин В.С. Коэффициент мощности электрических нагрузок в автономных деформированных системах. *Известия высших учебных заведений. Энергетика*. Минск: БГПИ. 1990, №4. С. 41 – 43.
 10. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии: ГОСТ ИЕC 61000-4-30-2017. [введен в действие от 01.12.2018]. Москва: Стандартинформ, 2018. 56 с.
 11. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-7. Методики испытаний и измерений. Общее руководство по измерениям и приборам для измерения гармоник и промежуточных гармоник для систем энергоснабжения и связанного с ним оборудования: IEC 61000-4-7:2002/Amd.1:2008. [введен в действие от 08.08.2002]. International Electrotechnical Commission, 2002. 13 с.
 12. Загирняк М.В., Род'кин Д.І., Ромашіхин Ю.В., Черний А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей: монография. Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2013. 164 с.

References (transliterated)

1. Mukha M.I. *Dynamichna kompensatsiya reaktyvnoi potuzhnosti u sudnovykh avtonomnykh elektroenerhetychnykh sistemakh: monohrafiia* [Dynamic Compensation of Reactive Power in Ship Autonomous Power Systems: monograph]. Saarbruekken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 381 p. ISBN: 978-613-9-99561-5.
2. Mukha M. A Full Mission Simulator of the Ship's Automated Electric Power System for Training and Competence Testing of Marine Engineers. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*. 2017. Vol. 4. pp. 153 – 160. doi 10.17265/2159-5879/2017.04.002.
3. Zahirniak M.V., Klepikov V.B., Kovbasa S.M., Mykhalskyi V.M., Peresada S.M., Sadovoi O.V., Shapoval I.A. *Energoefektyvni elektromehanichni systemy shyrokoho tekhnolohichnoho pryznachennia: monohrafiia* [Energy-efficient electromechanical systems of wide technological purpose: monograph]. Kyiv: IED NANU, 2018. 310 p. ISBN 978-966-02-8403-6.
4. Jan-Erik Rasanen, Eric W Schreiber. Using Variable Frequency Drives (VFD) to save energy and reduce emissions in newbuilds and existing ships. *Energy efficient solutions*. London: Lloyd's Maritime Academy, ABB, 2012. 11 p.
5. Drankova A., Mukha M., Mikhaykov S., Krasovskyi I. Electromechanical Laboratory Complex for Power Quality Studies of the Ship Electrical System. *IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Lviv-Slavskie: Lviv Polytechnic National University, Ukraine, 15-18 September, 2019. PS2, N15. doi: 10.1109/CPEE47179.2019.8949147.
6. Mukha M., Drankova A. About practical preparation of marine eng-
- ineers on the electromechanical systems laboratory. *Computational problems of electrical engineering*. 2018. Vol. 8, №2. pp. 66 – 72.
7. Mukha M., Drankova A., Bousher V., Shestaka A. PLC-based ship's electromechanical systems laboratory. *Proceedings of the 13th International Conference on the Engine Room Simulators*. Odessa: National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine, 20-21 September, 2017. pp. 183 – 190.
8. Zahirniak M.V., Mamchur D.H., Kalinov A.P., Chumachova A.V. *Diahnostiqa asynkhronnykh dyhuniv na osnovi analizu syhnu spozhyvanoj potuzhnosti: monohrafiia* [Diagnosis of asynchronous motors based on the analysis of the power consumption signal: monograph]. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V., 2013. 208 p. ISBN 978-617-639-037-4.
9. Petrushin V.S. *Koefficient moshchnosti elektricheskikh nagruzok v avtonomnykh deformirovannykh sistemah* [Power factor of electric loads in autonomous deformed systems]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Energetika* [Energetika. Proceedings of higher education institutions]. Minsk: BGPI. 1990, №4, pp. 41 – 43.
10. *Elektromagnitnaya sovmestimost' (EMS)*. CHast' 4-30. Metody ispytanij i izmerenij. Metody izmerenij kachestva elektricheskoy energii: GOST IEC 61000-4-30-2017. [vveden v dejstvie ot 01.12.2018] [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30. Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods: IEC 61000-4-30-2017 from 01.12.2018]. Moskva: Standartinform, 2018. 56 p.
11. *Elektromagnitnaya sovmestimost' (EMS)*. CHast' 4-7. Metodiki ispytanij i izmerenij. Obshchee rukovodstvo po izmereniyam i priboram dlya izmerenija garmonik i promezhutochnyh garmonik dlya sistem energosnabzheniya i svyazannogo s nim oborudovaniya: IEC 61000-4-7:2002/Amd.1:2008. [vveden v dejstvie ot 08.08.2002] [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-7. Testing and measurement techniques. General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto: IEC 61000-4-7:2002/Amd.1:2008 from 08.08.2002]. International Electrotechnical Commission, 2002. 13 p.
12. Zagirnyak M.V., Rod'kin D.I., Romashihin YU.V., Chernyj A.P. *Energeticheskij metod identifikacii parametrov asinhronnyh dvigatelej: monografiya* [The energy method of identifying the parameters of induction motors: monograph]. Kremenchug: CHP SHCHerbatykh A.V., 2013. 164 p.

Received 09.02.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Муха Николай Йосифович (Муха Микола Йосифович, Mykola Mukha) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Одеська морська академія», завідувач кафедри суднової електромеханіки і електротехніки; м. Одеса, Україна; e-mail: n.mukha52@gmail.com

Дранкова Алла Олеговна (Дранкова Алла Олегівна, Alla Drankova) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри суднової електромеханіки і електротехніки; м. Одеса, Україна; e-mail: drankova64@gmail.com

Красовский Игорь Игоревич (Красовський Ігорь Ігорович, Igor Krasovskyi) – суднова компанія Minerva Marine, електромеханік; м. Одеса, Україна; e-mail: garrakrass@gmail.com

Е. В. САКУН

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ СКОРОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С УПРОЩЕННОЙ КОРОБКОЙ ПЕРЕДАЧ

Ограниченність мирових запасов нефти і газу, а також постійно ухудшаючаяся екологічна обстановка в крупних містах обумовлюють необхідність переходу людства на електричний транспорт. В зв'язку з тим, що використовувані в електромобілях акумуляторні батареї мають високу вартість, вагу, габарити і забезпечують обмежену дальність пробігу без підзарядки, актуальним завданням є підвищення енергоефективності всіх компонентів тягового електроприводу. У статті розглянута можливість створення системи електроприводу для електромобіля зі спрощеною двошвидкісною коробкою передач, що не тільки підвищує енергоефективність електроприводу, а й усуває необхідність в механічних фрикційних синхронізаторах за рахунок синхронізації швидкостей валів шляхом програмного керування електричним перетворювачем. Запропоновано систему керування процесом синхронізації, побудовану за принципом системи підлеглого регулювання з двома контурами: контуром регулювання струму і контуром регулювання швидкості вала двигуна зі зміною структури електромеханічної системи під час руху електромобіля. Розроблено комп'ютерну модель системи, що включає в себе модель електродвигуна і трансмісії, модель напівпровідниково-го силового перетворювача, блок регулятора струму, блок регулятора швидкості, блок розрахунку сигналу завдання швидкості, блок програмного керування перемиканням передач і блок моделі водія. В якості параметрів моделювання були використані дані створеного на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» електромобіля на базі автомобіля «Ланос». Приведені і проаналізовані графіки переходних процесів при разгоні та торможенні електромобіля з переключенням передач. Получені результаты моделирования подтверждают реализуемость предложенной идеи.

Ключові слова: електропривод, електромобіль, коробка передач, синхронізація.

Є. В. САКУН

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ ШВИДКОСТЕЙ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ЗІ СПРОЩЕНОЮ КОРОБКОЮ ПЕРЕДАЧ

Обмеженість світових запасів нафти і газу, а також погіршення екологічної ситуації у великих містах обумовлюють необхідність переходу людства на електричний транспорт. У зв'язку з тим, що використовувані в електромобілях акумуляторні батареї мають високу вартість, вагу, габарити і забезпечують обмежену дальність пробігу без підзарядки, актуальним завданням є підвищення енергоефективності всіх компонентів тягового електроприводу. У статті розглянута можливість створення системи електроприводу для електромобіля зі спрощеною двошвидкісною коробкою передач, що не тільки підвищує енергоефективність електроприводу, а й усуває необхідність в механічних фрикційних синхронізаторах за рахунок синхронізації швидкостей валів шляхом програмного керування електричним перетворювачем. Запропоновано систему керування процесом синхронізації, побудовану за принципом системи підлеглого регулювання з двома контурами: контуром регулювання струму і контуром регулювання швидкості вала двигуна зі зміною структури електромеханічної системи під час руху електромобіля. Розроблено комп'ютерну модель системи, що включає в себе модель електродвигуна і трансмісії, модель напівпровідниково-го силового перетворювача, блок регулятора струму, блок регулятора швидкості, блок розрахунку сигналу завдання швидкості, блок програмного керування перемиканням передач і блок моделі водія. В якості параметрів моделювання були використані дані створеного на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» електромобіля на базі автомобіля «Ланос». Наведено і проаналізовано графіки переходних процесів при розгоні і гальмуванні електромобіля з перемиканням передач. Отримані результати моделювання підтверджують можливість реалізації запропонованої ідеї.

Ключові слова: електропривод, електромобіль, коробка передач, синхронізація.

Y. V. SAKUN

COMPUTER SIMULATION OF SPEED SYNCHRONIZATION PROCESS IN ELECTRIC VEHICLE DRIVE WITH SIMPLIFIED 2-SPEED GEARBOX

The limited global oil and gas reserves, as well as the constantly deteriorating environmental situation in large cities, necessitate the transition of mankind to electric transport. Due to the fact that the used batteries have a high cost, weight, and dimensions and provide a limited range without recharging, an urgent task is to increase the energy efficiency of all components of the traction electric drive. The article considers the possibility of creating an electric drive system for an electric car with a simplified two-speed gearbox, which not only increases the energy efficiency of the electric drive but also eliminates the need for mechanical friction synchronizers by synchronizing shaft speeds by software control of the power converter. A synchronization process control system based on the principle of cascade control with two loops is proposed: a current control loop and a motor shaft speed control loop with a change in the structure of the electromechanical system while the electric vehicle is moving. A computer model of the system has been developed, which includes a model of an electric motor and transmission, a model of a semiconductor power converter, a current regulator block, a speed regulator block, a speed reference signal calculation block, a gear shift program control block, and a driver model block. As the modeling parameters, we used real data from an electric vehicle created at the Automated Electromechanical Systems Department of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" based on the "Lanos" car. The transients during acceleration and braking of an electric vehicle with gear shifting are presented and analyzed. The obtained simulation results confirm the feasibility of the proposed idea.

Keywords: motor control, electric vehicle, gearbox, synchronization.

Введение. Ограниченність мирових запасов нефти і газу, а також постійно ухудшаючаяся екологічна обстановка в крупних містах обумовлюють необхідність переходу людства на альтернативні види транспорту. По мнению экспертов, в бли-

жайшем будущем автомобили с двигателями внутреннего горения будут заменены на электромобили [3]. По состоянию на 2018 г. в мире было продано более 5 млн электромобилей, из которых 2,2 млн. в Китае, 1,3 млн. в Европе и 1,1 млн. в США [4].

© Е. В. Сакун, 2020

Источником энергии в электромобиле является аккумуляторная батарея, от ёмкости которой зависит дальность пробега без подзарядки. В связи с тем, что используемые аккумуляторные батареи имеют высокую стоимость, вес и габариты и обеспечивают ограниченную дальность пробега без подзарядки, актуальной задачей является повышение энергоэффективности всех компонентов тягового электропривода, включая аккумуляторную батарею, силовой преобразователь, двигатель и трансмиссию.

Один из способов повышения энергоэффективности – поддержание рабочего режима электродвигателя в зоне рационального коэффициента полезного действия, который, при отклонениях от номинального режима работы электродвигателя, существенно снижается. Как известно, коэффициент полезного действия зависит от развиваемого электродвигателем момента и скорости вращения. Снижение потерь в электроприводе электромобиля возможно за счёт применения коробки передач и переключения передач таким образом, чтобы электродвигатель находился в области с более высоким КПД [9-12]. На рис. 1 представлена типовая диаграмма областей в осях момент-скорость с указанием КПД электродвигателя электромобиля, характерного для каждой из этих областей [9].

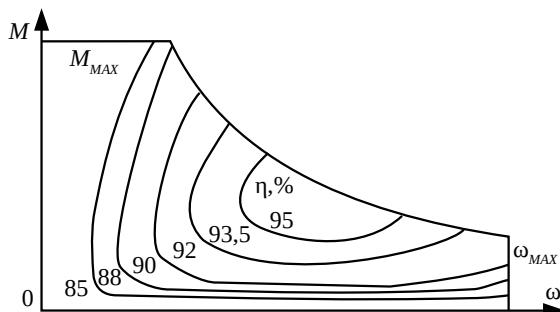


Рис. 1. Диаграмма КПД двигателя электромобиля

Переключение коробки передач приводит к одновременному изменению как момента на колесе, так и скорости двигателя и поэтому, переключение должно быть произведено таким образом, чтобы рабочая точка оказалась в зоне повышенных значений КПД. В [12] утверждается, что в отличие от автомобилей, коробка передач может быть не столь сложной и достаточно ограничиться двумя передачами. В [9] показано, что эффект экономии электрической энергии зависит от цикла движения и типа коробки передач и может составлять для легкового транспорта более 10%. Эффект для грузового и внедорожного транспорта может быть ещё выше.

Однако, применение традиционных коробок передач в электромобилях имеет и существенные недостатки: увеличивается сложность конструкции, вес, стоимость, снижается её надёжность по сравнению с односкоростной передачей. Этим объясняется, что большинство выпускаемых легковых электромобилей производится с односкоростной трансмиссией [13].

В настоящее время ведутся работы по созданию специализированных коробок передач для применения в электрическом транспорте, которые отличаются

меньшим числом передач, более высоким КПД и лучшими массогабаритными показателями. В [14-16] предлагается упрощение конструкции механической коробки передач за счёт выполнения функции синхронизации скоростей валов программным управлением полупроводниковым преобразователем, а не с помощью фрикционных механизмов, как в автомобилях. Такое решение позволяет исключить сцепление из трансмиссии электромобиля.

В настоящей работе рассматривается исполнение двухскоростной коробки передач, в которой, при переключении скоростей, обеспечивается не только синхронизация скоростей валов, но и синхронизация по положению кулачков муфты и шестерни, входящих в зацепление при переключении передачи. Такое решение позволяет повысить надёжность переключения, исключить из коробки передач фрикционные синхронизаторы, упростить форму кулачков и уменьшить ударные нагрузки в момент соединения. Сущность технической реализации вышеуказанного предложения описана в [1, 2].

Цель статьи – пояснить сущность функционирования двухскоростной коробки передач, обосновать компьютерным моделированием возможность её технической реализации и определить принципы построения стенда для экспериментального исследования.

Материал и результаты исследований. На рисунке 2 показана кинематическая схема механической части электропривода электромобиля с упрощённой двухскоростной коробкой передач. Вращающий момент двигателя (1) передаётся на первичный вал коробки передач (10), на котором жёстко закреплены первичные шестерни передач (11 и 9). На вторичном валу (7) находятся вторичные шестерни (3 и 6), но, в отличие от первичных шестерен, они установлены на подшипниках и могут вращаться независимо от вторичного вала.

Первичные и вторичные шестерни передач всегда находятся в зацеплении и врачаются с пропорциональными скоростями. Коэффициент пропорциональности зависит от соотношения числа зубьев на первичной и вторичной шестернях каждой передачи. В общем случае, обе вторичные шестерни имеют разные угловые скорости вращения. Режим, когда вторичный вал вращается независимо от обеих вторичных шестерен, соответствует нейтральной передаче. В этом режиме вращающий момент двигателя не передаётся на вторичный вал коробки передач.

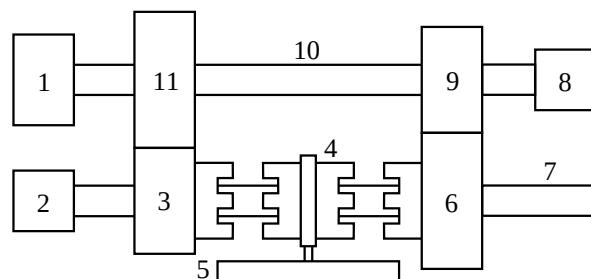


Рис. 2. Кинематическая схема электропривода электромобиля с двухскоростной коробкой передач

Для передачи вращающего момента на вторичный вал нужно жёсткое соединение одной из вторичных шестерен с этим валом. Такое соединение осуществляется с помощью подвижной муфты (4). Она всегда вращается со скоростью вторичного вала, и, благодаря подвижному шлицевому соединению, может перемещаться вдоль него. Перемещаясь вдоль вала, муфта может соединяться со вторичной шестерней передачи с помощью кулачков, имеющихся на муфте и на шестерне. При этом происходит жёсткое соединение одной из вторичных шестерен передачи со вторичным валом коробки передач. Перемещение муфты выполняется маломощным электроприводом (5) по сигналу системы управления ЭП электромобиля.

Очевидно, что для соединения вторичного вала с вторичной шестерней передачи без возникновения удара их угловые скорости должны быть равны. В [1, 2] для синхронизации скоростей вала и вторичной шестерни передачи предлагается применение программного управления электроприводом. Реализация обратной связи по скоростям первичного и вторично-го валов в коробке передач осуществляется с помо-щью энкодеров (8 и 2 на рис. 2).

Для исследований процессов синхронизации был выбран электропривод на базе двигателя постоянного тока, установленный на электроприводе электромобиля, созданного на базе автомобиля «Ланос» для учебных и научных целей кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ». Функциональная схема электропривода показана на рис. 3.

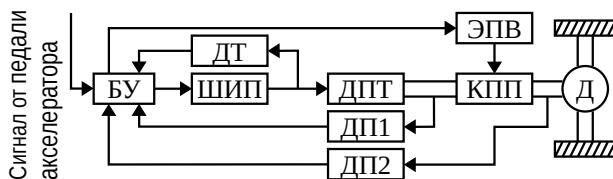


Рис. 3. Функциональная схема электропривода

Двигатель постоянного тока (ДПТ) питается от широтно-импульсного преобразователя напряжения (ШИП). Ротор двигателя соединён с первичным валом коробки переключения передач (КПП). Вторичный вал коробки передач соединён с дифференциалом (Д), который распределяет вращающий момент между колёсами электромобиля. Блок управления (БУ), получая сигнал задания момента от водителя, обратных связей от датчика тока (ДТ) и датчиков положения первичного и вторичного валов коробки передач (ДП1 и ДП2), рассчитывает напряжение задания для ШИП, а также передаёт команду управления переключением передач на электропривод вилки (ЭПВ), перемещающей муфту и вводящий её в зацепление с шестерней.

Математическая модель ДПТ с учётом индуктивности якоря имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_a &= R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \\ M &= K\Phi I_a, \quad E = K\Phi \omega, \\ M - M_c &= J_z d \frac{\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R_a – активное сопротивление цепи якоря, L_a – индуктивность цепи якоря, U_a – напряжение на якоре, I_a – ток якоря, E – ЭДС двигателя, K – конструктивный коэффициент машины постоянного тока, Φ – магнитный поток возбуждения, ω – угловая скорость ротора, M – вращающий момент двигателя, M_c – момент сопротивления, J_z – суммарный момент инерции ротора и первичного вала.

При движении электромобиля момент электропривода (M_3) задаётся водителем с помощью педали акселератора. В двигателе постоянного тока вращающий момент пропорционален току якоря, что позволяет заменить систему регулирования момента на систему регулирования тока якоря, структурная схема которой показана на рис. 4. В данной системе ШИП представлен в виде апериодического звена с постоянной времени T_μ , а приведенный момент инерции J_z равен суммарному моменту инерции ротора двигателя и приведенных к скорости двигателя массы электромобиля и вращающихся частей механической части.

Применение ПИ-регулятора тока (РТ) с коэффициентами $K_{\text{ПР}}$ и $K_{\text{ИР}}$ позволяет настроить контур на модульный оптимум.

Для синхронизации скоростей валов может быть использована классическая двухконтурная система подчинённого регулирования скоростью двигателя с внутренним контуром тока (СПР), приведенная на рис. 5. Применение П-регулятора скорости (РС) с коэффициентом $K_{\text{РС}}$ позволяет настроить контур скорости на модульный оптимум.

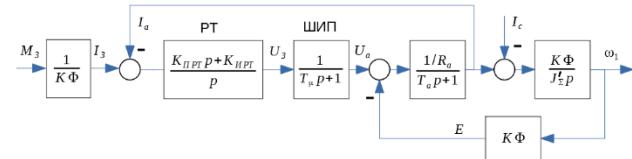


Рис. 4. Система управления моментом двигателя

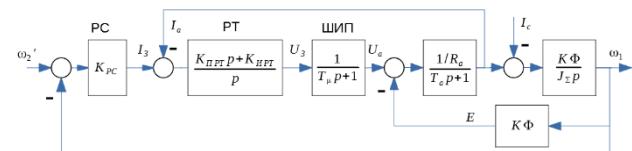


Рис. 5. Система управления синхронизацией скоростей валов

В качестве сигнала задания на вход системы поступает скорость вращения вторичного вала, приведенная к скорости первичного вала, которая рассчитывается как:

$$\omega_2' = \frac{N_2 \omega_2}{N_1}, \quad (2)$$

где ω_2 – скорость вращения вторичного вала, N_1 и N_2 – количество зубьев первичной и вторичной шестерен требуемой передачи.

Использование микропроцессора в качестве управляющего устройства измеряет скорости вала двигателя и выходного вала коробки передач в процессе движения одновременно.

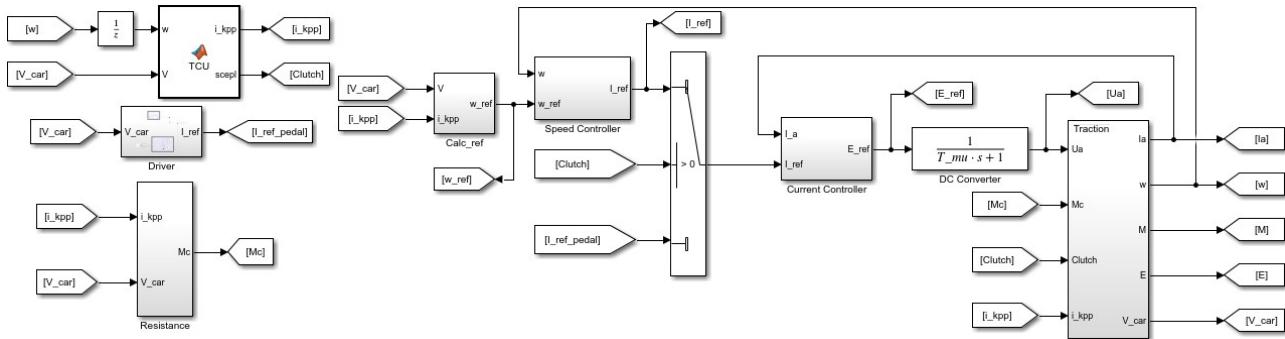


Рис. 6. Компьютерная модель электропривода в блочном виде

В тоже время микропроцессор анализирует значения сигналов момента (тока) и скорости двигателя и, при определении целесообразности перехода на другую скорость, изменяет структуру регулятора, представленную на рис. 4, дополняя её пропорциональным регулятором, на вход которого подаётся разность сигналов $\omega_2' - \omega_1$. Проверим компьютерным моделированием реализуемость согласования скоростей валов при переходе с одной структуры на другую, рассмотрев процесс оптимального разгона по быстродействию до номинальной скорости на первой передаче и последующего переключения на вторую.

Компьютерная модель электропривода с двухскоростной энергoeffективной коробкой передач была построена в программном пакете Matlab/Simulink и представлена в блочном виде на рис. 6. Модель состоит из следующих блоков: модель электродвигателя и трансмиссии (Traction), модель полупроводникового силового преобразователя (DC Converter), блок регулятора тока (Current Controller), блок регулятора скорости (Speed Controller), блок расчёта сигнала задания скорости (Calc_ref), блока программного управления переключением передач (TCU), блока модели водителя (Driver). Блок модели электродвигателя и трансмиссии, в свою очередь, состоит из модели электромеханического преобразования энергии, блоков расчёта скоростей электромобиля и электродвигателя.

На рис. 7 показана модель блока регулятора скорости, включающая в себя сумматор для вычисления ошибки по скорости, П-регулятор скорости и блок ограничения выходного сигнала. Значение коэффициента регулятора было рассчитано для настройки контура скорости на модульный оптимум. На рис. 8 показан блок расчёта скорости задания для режима синхронизации скоростей, выходной сигнал которого пропорционален скорости движения электромобиля и передаточному числу включаемой передачи. На рис. 9 показан блок регулятора тока с ПИ-регулятором и блоками ограничения входного и выходного сигналов. Коэффициенты ПИ-регулятора рассчитаны для настройки контура тока на модульный оптимум.

На рис. 10 показана модель электромеханического преобразования энергии, входным сигналом которой является напряжение якоря U_a , а выходными – ток двигателя I_a , врачающий момент M и противо-ЭДС E . На рис. 11 показана модель блока расчёта скорости электромобиля. Входными сигналами являются мо-

мент двигателя M , момент сопротивления M_c , приведенный момент инерции автомобиля J_{car} , суммарный момент инерции нейтральной передачи J_{full} и сигнал включения синхронизации скоростей Clutch. Для расчёта скорости электромобиля использован интегратор, на вход которого поступает ускорение, рассчитанное как отношение суммы приведенных сил, действующих на электромобиль, к его приведенной массе. Когда сигнал Clutch активен, на электромобиль действуют только сила аэродинамического сопротивления воздуха и трение качения колес, а в приведенную массу не входят составляющие моментов инерции ротора двигателя и валов коробки передач.

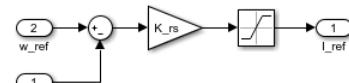


Рис. 7. Блок регулятора скорости

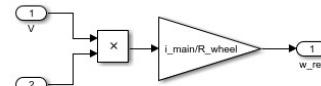


Рис. 8. Блок расчёта скорости задания

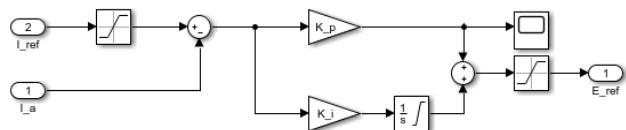


Рис. 9. Блок регулятора тока

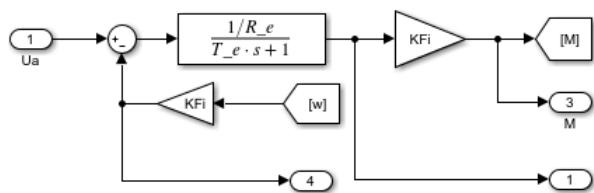


Рис. 10. Модель электромеханического преобразования энергии

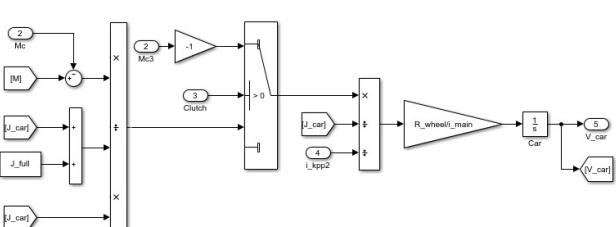


Рис. 11. Блок расчёта скорости электромобиля

На рис. 12 показана модель блока расчёта скорости электродвигателя. Входными сигналами блока являются момент двигателя M , сопротивления M_c , приведенный момент инерции автомобиля J_{car} , суммарный момент инерции нейтральной передачи J_{full} и сигнал включения синхронизации скоростей Clutch. Когда Clutch активен, на вал электродвигателя действуют только его собственный момент, а в приведенный момент инерции не входит составляющая при веденной массы электромобиля. На рис. 13 показана модель блока расчёта момента сопротивления, состоящего из постоянной составляющей силы трения качения и силы аэродинамического сопротивления, пропорциональной квадрату скорости электромобиля. При моделировании использовались параметры электромобиля (табл. 1), созданного в НТУ «ХПИ» на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» на основе автомобиля «Ланос» для учебно-научных целей.

На рис. 14 показаны зависимости скорости двигателя от скорости электромобиля для двух передаточных чисел упрощённой коробки передач. Жирная кривая показывает оптимальную траекторию для наиболее быстрого разгона и торможения. При принятых допущениях скорость электромобиля для переключения передачи при разгоне или торможении составляет 28 км/ч. Она будет достигнута при разгоне тогда, когда скорость двигателя достигнет номинального значения – 350 рад/с. Дальнейшее повышение скорости электромобиля возможно только на следующей передаче, для чего необходимо разомкнуть текущую передачу перемещением муфты в нейтральное положение, снизить скорость двигателя до приведенной скорости второго вала на 2-й передаче и перемещением муфты включить 2-ю передачу.

На рис. 15 показана временная диаграмма разгона электромобиля с двухскоростной коробкой передач до 60 км/ч и торможения до полного останова. В интервале $0 \div t_1$ происходит разгон электромобиля на первой передаче с номинальным моментом двигателя. В интервале $t_1 \div t_2$ происходит размыкание первой передачи, снижение скорости двигателя для синхронизации шестерни вторичной передачи с муфтой переклю-

чения передач и включение второй передачи. Видно, что при синхронизации скоростей момент двигателя меняет знак и достигает максимального отрицательного значения. В интервале $t_2 \div t_3$ происходит разгон электромобиля на второй передаче с номинальным значением момента двигателя. В интервале $t_3 \div t_4$ момент двигателя меняет знак и происходит торможение электромобиля на второй передаче. В интервале $t_4 \div t_5$ происходит размыкание второй передачи, повышение скорости двигателя для синхронизации шестерни первичной передачи с муфтой переключения передач и включение первой передачи. Видно, что для синхронизации скоростей момент двигателя меняет знак и достигает максимального положительного значения. На интервале $t_5 \div t_6$ происходит торможение электромобиля на первой передаче с отрицательным номинальным моментом двигателя до полной остановки.

На рис. 16 показан процесс синхронизации скоростей на интервале $t_1 \div t_2$ при переключении с первой передачи на вторую. Видно, что момент двигателя меняет знак и достигает максимального отрицательного значения, обеспечивая минимальное время синхронизации. Как только скорость двигателя снижается до значения приведенной скорости вращения муфты переключения передач, момент двигателя возвращается к номинальному положительному значению и электромобиль продолжает ускорение.

На рис. 17 показан процесс синхронизации скоростей на интервале $t_4 \div t_5$ при торможении и переключении со второй передачи на первую. Видно, что момент двигателя меняет знак и достигает максимального положительного значения, обеспечивая минимальное время синхронизации. Как только скорость двигателя повышается до значения приведенной скорости вращения муфты переключения передач, момент двигателя возвращается к номинальному отрицательному значению и электромобиль продолжает торможение.

Из граф. 16, 17 видно, что время синхронизации скоростей валов при переключении передачи составляет не более 70 мс, что меньше среднего времени синхронизации для автомобилей с двигателем внутренне-го сгорания и фрикционными синхронизаторами. Такое быстродействие повышает управляемость электромобиля и плавность движения.

Таблица 1 – Параметры моделирования

Номинальное напряжение двигателя U_a , В	72
Номинальный ток двигателя I_{nom} , А	200
Максимальный ток двигателя I_{max} , А	500
Сопротивление обмотки якоря R_a , Ом	0,01
Индуктивность обмотки якоря L_a , мГн	0,093
Конструктивный коэффициент машины КФ	0,2
Момент инерции ротора J , кгм	0,0268
Масса автомобиля m_{car} , кг	1595
Передаточное число первой передачи i_1	3,545
Передаточное число второй передачи i_2	1,478
Передаточное число главной передачи i_{main}	3,722
Коэффициент трения качения f_r	0,013
Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x	0,377

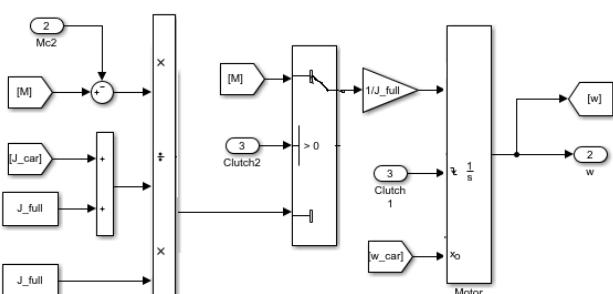


Рис. 12. Блок расчёта скорости электродвигателя

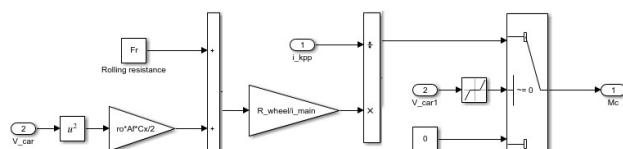


Рис. 13. Блок расчёта момента сопротивления

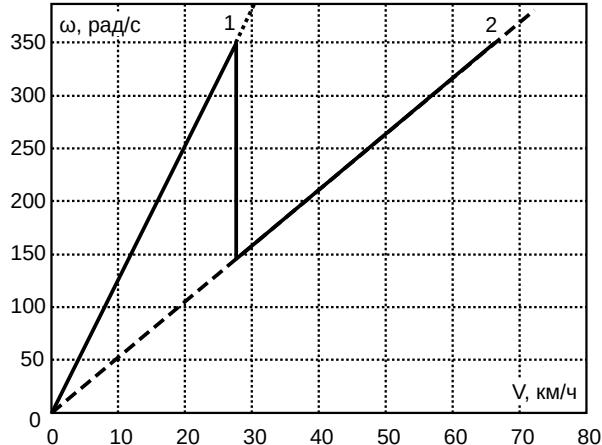


Рис. 14. Зависимость скорости двигателя от скорости электромобиля для 2-скоростной коробки передач

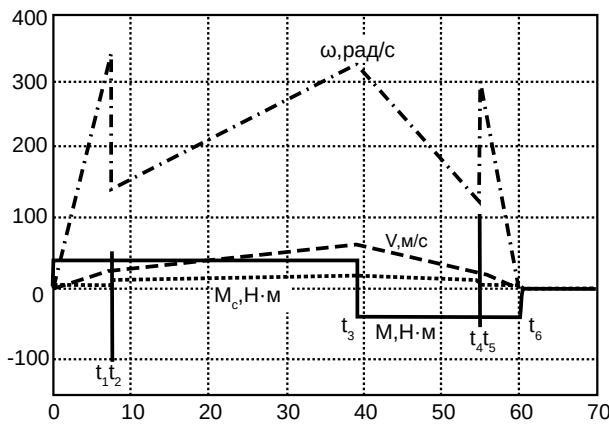


Рис. 15. Разгон электромобиля до 60 км/ч и торможение

Проведённый эксперимент подтверждает предложенный принцип согласования скоростей валов переходом от одной структуры управления (по моменту/тoku) к другой по разности скоростей валов коробки передач. Очевидно, что для обеспечения согласования по фазе кулачков муфты переключения и шестерни передачи используя промоделированный выше принцип перехода от одной структуры к другой следует дополнить структуру управления контуром регулирования по положению. При этом, в качестве входного сигнала регулятора положения следует использовать рассчитанное микропроцессором рассогласование положений кулачков шестерни и муфты, с учётом их числа.

Выводы. Выполненное компьютерное моделирование подтверждает возможность реализации упрощённой двухскоростной энергоэффективной коробки передач, исключающей механические синхронизаторы. Реализация достигается с помощью микропроцессорного электропривода программным управлением с изменением структуры электромеханической системы при движении электромобиля.

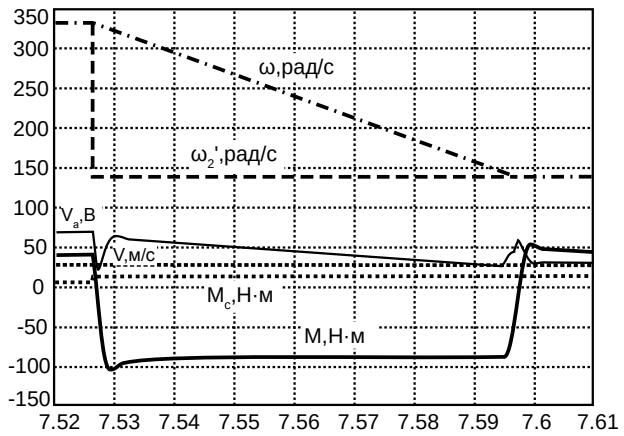


Рис. 16. Синхронизация скоростей при переключении с первой передачи на вторую

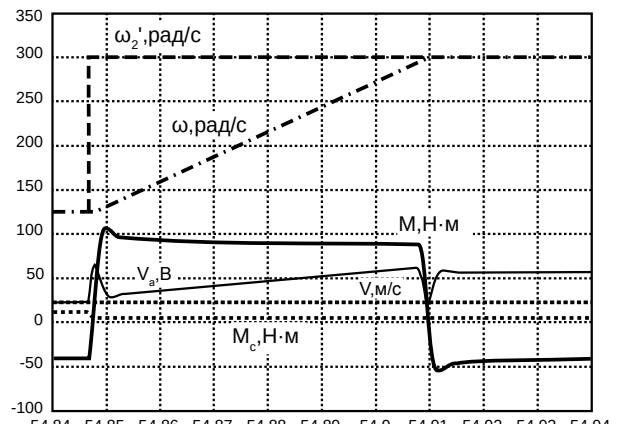


Рис. 17. Синхронизация скоростей при переключении со второй передачи на первую

Список литературы

- Клепиков В.Б., Сакун Е.В., Курочкин Д.А. Керування електроприводом електромобіля з енергоефективною коробкою передач. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Харків: НТУ «ХПІ», 2019, №9(1334). С. 94 – 98. doi: 10.20998/2079-8024.2019.9.18.
- Клепиков В.Б., Сакун Е.В., Моїсеєв О.М., Семіков О.В., Курочкин Д.А. Електропривод електромобіля з коробкою перемикання передач. Патент UA, № U201906000, 2019.
- Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте. Техническая электродинамика. Киев: ИЕД НАНУ. 2008, №4. С.43 – 47.
- Electric car use by country.* URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country. (дата обращения 15.06.2019).
- Клепиков В.Б., Гончар А.С. Рекуперативные режимы электропривода электромобиля с суперконденсаторами. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Темат. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Кременчук: КрНУ. 2012, №3(19). С. 216 – 218.
- Клепиков В.Б., Сакун Е.В. Программная синхронизация положений валов коробки передач электропривода электромобиля. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Темат. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Силова електроніка та енергоефективність. Харків: НТУ «ХПІ». 2017, Вип. 27(1249). С. 445 – 448.
- Khaligh A., Li Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. *IEEE Transactions on vehicular technology*. 2010. Vol. 59, Issue 6. pp. 2806 – 2811. doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.

8. Shen J., Khaligh A. A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery/ Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2015. Vol. 1, Issue 3. pp. 223 – 231. doi: 10.1109/TTE.2015.2464690.
9. Ren Q., Crolla D.A., Morris A. Effect of Transmission Design on Electric Vehicle (EV) Performance. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Dearborn, Michigan, USA, 7-10 September, 2009. pp. 1260 – 1265. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289707.
10. Bottiglione F., De Pinto S., Mantriota G., Sorniotti A. Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission. *Energies*. 2014, Vol. 7, Issue 12. pp. 8317 – 8337. doi:10.3390/en7128317.
11. Hofman T., Dai C. H. Energy Efficiency Analysis and Comparison of Transmission Technologies for an Electric Vehicle. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Lille, France, 1-3 September, 2010. pp. 1 – 6. doi: 10.1109/VPPC.2010.5729082.
12. Spanoudakis P., Tsourveloudis N.C., Koumartzakis G., Krahtoudis A., Karpouzis T., Tsinaris I. Evaluation of a 2-speed transmission on electric vehicle's energy consumption. *Proceedings of the IEEE International Electric Vehicle Conference*. Florence, Italy, 17-19 December, 2014. pp. 1 – 6. doi: 10.1109/IEVC.2014.7056116.
13. Grunditz E., Thiringer T. Performance Analysis of Current BEVs - Based on a Comprehensive Review of Specifications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2016, Vol. 2. Issue 3. pp. 270 – 289. doi: 10.1109/TTE.2016.2571783.
14. Jun-Qiang Xi, Xiong Guang-Ming, Zhang Yan. Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Hardin, China, 3-5 September, 2008. pp. 1 – 5. doi: 10.1109/VPPC.2008.4677583.
15. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng. Research on gear-change control technology for the clutchless automatic–manual transmission of an electric vehicle. *Journal of Automobile Engineering. Part D: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2013. Vol. 227, Issue 10. pp. 1446 – 1458. doi: 10.1177/0954407013482676.
16. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng, Chin-Ping Wang. Smooth gearchange control for EV Clutchless Automatic Manual Transmission. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Kachsiung, Taiwan, 11-14 July, 2012. pp. 971 – 976. doi: 10.1109/AIM.2012.6266016.

References (transliterated)

1. Klepikov V.B., Sakun Ye.V., Kurochkin D.A. Keruvannia elektropryvodom elektromobilia z enerhoefektyvnioi korobkoiu peredach [Control of electric vehicle drive with energy efficient multi-speed gearbox]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut» Ser.: Problemy avtomatyzovano ho elektropryvoda. Teoriia i praktyka* [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2019, №9(1334). pp. 94 – 98. doi: 10.20998/2079-8024. 2019.9.18.
2. Klepikov V.B., Sakun Ye.V., Moisieiev O.M., Siemikov O.V., Kurochkin D.A. Elektropryvod elektromobilia z korobkoiu peremykannya peredach [Electric vehicle drive with multi-speed gearbox]. Patent UA, no. U201906000, 2019.
3. SHidlovskij A.K., Pavlov V.B., Popov A.V. Primenenie superkondensatorov v avtonomnom akkumulyatornom elektrotransporte [Supercapacitors usage in autonomous battery electric vehicle]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical Electrodynamics]. Kyiv: IED NANU. 2008, №4. pp. 43 – 47.
4. *Electric car use by country*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country. (accessed 15.06.2019).
5. Klepikov V.B., Gonchar A.S. Rekuperativnye rezhimy elektropryvoda elektromobilya s superkondensatorami [Recuperative electric drive modes of the electromobile with supercapacitor]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. Temat. vyp.: Problemy avtomatyzovano ho elektropryvoda. Teoriia i praktyka* [Electromechanical and Energy Saving Systems. Thematic issue: Problems of automatic electric drive. Theory and applications]. Kremenchuk: KrNU. 2012, №3(19). pp. 216 – 218.
6. Klepikov V.B., Sakun E.V. Programmnaya sinhronizaciya polozhenii valov korobki peredach elektropryvoda elektromobilya [Position synchronization of gearbox shafts of electric vehicle]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut»*. Temat. vyp.: Problemy avtomatyzovano ho elektropryvoda. Teoriia i praktyka. Sylva elektronika ta enerhoefektyvnist [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Thematic issue: Problems of automated electrodrives. Theory and practice. Power Electronics and Energy Efficiency]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. Vyp. 27(1249). pp. 445 – 448.
7. Khaligh A., Li Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. *IEEE Transactions on vehicular technology*. 2010. Vol. 59, Issue 6. pp. 2806 – 2811. doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.
8. Shen J., Khaligh A. A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery/ Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2015. Vol. 1, Issue 3. pp. 223 – 231. doi: 10.1109/TTE.2015.2464690.
9. Ren Q., Crolla D.A., Morris A. Effect of Transmission Design on Electric Vehicle (EV) Performance. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Dearborn, Michigan, USA, 7-10 September, 2009. pp. 1260 – 1265. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289707.
10. Bottiglione F., De Pinto S., Mantriota G., Sorniotti A. Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission. *Energies*. 2014, Vol. 7, Issue 12. pp. 8317 – 8337. doi:10.3390/en7128317.
11. Hofman T., Dai C. H. Energy Efficiency Analysis and Comparison of Transmission Technologies for an Electric Vehicle. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Lille, France, 1-3 September, 2010. pp. 1 – 6. doi: 10.1109/VPPC.2010.5729082.
12. Spanoudakis P., Tsourveloudis N.C., Koumartzakis G., Krahtoudis A., Karpouzis T., Tsinaris I. Evaluation of a 2-speed transmission on electric vehicle's energy consumption. *Proceedings of the IEEE International Electric Vehicle Conference*. Florence, Italy, 17-19 December, 2014. pp. 1 – 6. doi: 10.1109/IEVC.2014.7056116.
13. Grunditz E., Thiringer T. Performance Analysis of Current BEVs - Based on a Comprehensive Review of Specifications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2016, Vol. 2. Issue 3. pp. 270 – 289. doi: 10.1109/TTE.2016.2571783.
14. Jun-Qiang Xi, Xiong Guang-Ming, Zhang Yan. Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Hardin, China, 3-5 September, 2008. pp. 1 – 5. doi: 10.1109/VPPC.2008.4677583.
15. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng. Research on gear-change control technology for the clutchless automatic–manual transmission of an electric vehicle. *Journal of Automobile Engineering. Part D: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2013. Vol. 227, Issue 10. pp. 1446 – 1458. doi: 10.1177/0954407013482676.
16. Yu Chih-Hsien, Chyuan-Yow Tseng, Chin-Ping Wang. Smooth gearchange control for EV Clutchless Automatic Manual Transmission. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Kachsiung, Taiwan, 11-14 July, 2012. pp. 971 – 976. doi: 10.1109/AIM.2012.6266016.

Поступила 05.02.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сакун Евгений Владиславович (Сакун Євген Владиславович, Sakun Yevhenii Vladyslavovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: eugene.sakun@gmail.com

ЮВІЛЕЙ

Андріенко Пётр Дмитриевич

26 апреля 2020 г. исполнилось 80 лет со дня рождения Петра Дмитриевича Андриенко, доктора технических наук, профессора, заслуженного изобретателя УССР, академика Транспортной академии наук Украины, заведующего кафедрой «Электрические и электронные аппараты» НУ «Запорізька політехніка».

Пётр Дмитриевич Андриенко родился в посёлке Ханженково Донецкой области.

В 1962 г. окончил факультет автоматики и телемеханики Одесского политехнического института. По окончании института был распределён во Всесоюзный институт трансформаторостроения (ВИТ, г. Запорожье). Работал инженером в технологическом отделе (бюро электропривода). Участвовал в разработке электропривода первой в СССР автоматической линии по раскрою рулонной электротехнической стали. В 1964 г. перешёл на работу в СКБ по полупроводниковой технике на должность старшего инженера лаборатории тиристорных агрегатов. С 1965 по 2008 гг. прошёл путь от старшего инженера, руководителя группы, начальника лаборатории, отдела до заместителя директора Всесоюзного научно-исследовательского института, а впоследствии директора Украинского института силовой электроники ОАО НИИ «Преобразователь». За этот период им была создана школа по исследованию, разработке и внедрению в производство устройств силовой электроники.

Под его руководством и непосредственном участии были созданы крупнейшие в СССР серии тиристорных агрегатов для постоянного тока типа АТ, АТР, АТВ мощностью до 1000 кВт; частотно-регулируемые электроприводы серий ЭКТ, ЭКТР, ЭКТ-1 мощностью до 500 кВт. По результатам разработок получено более 90 авторских свидетельств и патентов.

В 1990 г. П. Д. Андриенко удостоен звания «Заслуженный изобретатель УССР».

Проведённые в ходе разработок новой техники исследования явились основой его кандидатской диссертации «Защита реверсивных тиристорных агрегатов», (Одесский политехнический институт, 1971), а также докторской диссертации «Тиристорные преобразователи частоты с автономным инвертором для электропривода», (Институт электродинамики НАНУ 1990).

Под его руководством создан ряд новых типов преобразователей: для магистрального аммиакопровода «Тольятти-Одесса» мощностью 2000 кВт, на напряжение 6 кВ; для тяговой электропередачи переменного тока первого украинского дизель-поезда типа ДЕЛ-02, электровоза ВЛ-40У, электропоездов ЭД-9М; для первой украинской ветроэнергетической установки с аэродинамической мультиплексацией типа ТГ-1000.

П.Д. Андриенко – автор более 200 научных трудов в том числе 3 монографий, более 90 авторских свидетельств и патентов. Большое внимание он уделяет подготовке научных кадров.



Под его руководством были защищены 1 докторская и 8 кандидатских диссертаций. Работал доцентом, а с 1990 г. по 2011 г. – профессором (по совместительству) в ЗНТУ. С 2011 г. по настоящее время он работает заведующим кафедрой «Электрические и электронные аппараты» НУ «Запорізька політехніка».

Активно внедряет в учебный процесс новые методы и формы обучения; на кафедре организовано студенческое научно-конструкторское бюро, компьютерный класс для подготовки магистров и аспирантов, обучение студентов ведётся на русском, украинском и английском языках. Неоднократно был членом специализированных учёных советов по защите кандидатских и докторских диссертаций.

Член редколлегии научных журналов «Електротехніка і електроенергетика», «Електрифікація транспорту», «Комп'ютерні та електромеханічні системи».

П. Д. Андриенко, занимаясь педагогической деятельностью, не прерывал своей научно-практической деятельности, являясь 1-м заместителем генерального директора по науке ООО «НИИ Преобразователь».

Пётр Дмитриевич занимает активную позицию в общественной жизни. Он – один из инициаторов создания Ассоциации инженеров силовой электроники, которая объединяет более 300 известных учёных из стран СНГ. В 1994 - 1996 гг. – член исполкома Запорожского областного совета народных депутатов, заместитель председателя Запорожского областного научно-технического совета по вопросам энергосбережения.

За плодотворную научно-техническую и педагогическую работу П. Д. Андриенко награждён орденами: «Трудового Красного Знамени» (1981 г.); «За заслуги 3-й степени» (1998 г.); «За заслуги перед Запорізьким краєм» 3 степени (2015 г.); медалью «Ветеран труда».

Неоднократно награждён почётными грамотами Запорожской областной рады и Запорожской областной администрации.

Президиум
Украинской ассоциации инженеров электриков

ЗМІСТ**НАУКА ТА ОСВІТА**

- В. Б. Клепіков** До 90-річчя кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи»
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».....3

ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

- В. В. Грабко, О. В. Дідушок** Математична модель виявлення зносу контактної системи
при комутації вакуумного вимикача.....12

СУЧАСНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

- О. П. Чорний, В. Ю. Ноженко, В. К. Титюк, О. К. Данилейко** Дослідження пуску
частотно-регульованого електроприводу зарезонансної вібраційної машини19
- Б. М. Чунашвілі, А. М. Петросян, Т. Г. Гамрекелашвілі** Система керування пристроєм
обмеження вищих гармонік, що створені трифазними електродуговими печами.....26
- С. С. Міхайков** Пристрій керування навантаженням частотно-регульованого електропривода на базі ПЛК.30

КОМПОНЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

- Л. В. Асмолова, М. В. Аніщенко** Локаційні датчики на платі «Сенсори мехатроніки»
на базі освітньої платформи National Instruments.....35
- В. В. Бушер, О. В. Глазєва** Дослідження нормальних та аварійних режимів роботи суднових
високовольтних перетворювачів частоти.....40
- О. В. Семіков** Застосування багатофазного широтно-імпульсного перетворювача з двома
накопичувачами електроенергії в тяговому електроприводі електромобіля.....47

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

- Б. В. Воробйов** Енергоефективний асинхронний електропривод електромобілю.....52
- О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, О. В. Дяченко, І. Т. Карплюк, С. В. Швець** Аналіз методів
визначення часткової участі суб'єктів у відповідальності за порушення якості електроенергії
по синусоїdalності кривої напруги.....57
- О. Ю. Лозинський, Я. Ю. Марущак, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук** Технологічні особливості
представлення електричного режиму дугової сталеплавильної печі моделлю зміни станів.....63
- М. Й. Муха, А. О. Дранкова, І. І. Красовський** Експериментальна установка для вивчення і
дослідження енергоефективних режимів електромеханічних систем.....67
- Є. В. Сакун** Комп'ютерне моделювання синхронізації швидкостей в електроприводі електромобіля
зі спрощеною коробкою передач.....72

ЮВІЛЕЙ

- Андрієнко Петро Дмитрович.....79

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

В. Б. Клепиков К 90-летию кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».....	3
---	---

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В. В. Грабко, О. В. Дидушок Математическая модель выявления износа контактной системы при коммутации вакуумного выключателя.....	12
---	----

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А. П. Черный, В. Ю. Ноженко, В. К. Тытюк, О. К. Данилейко Исследование пуска частотно-регулируемого электропривода зарезонансной вибрационной машины.....	19
Б. М. Чунашвили, А. М. Петросян, Т. Г. Гамрекелашвили Система управления устройством ограничения высших гармоник, создаваемых трехфазными электродуговыми печами.....	26
С. С. Михайлов Устройство управления нагрузкой частотно-регулируемого электропривода на базе ПЛК.....	30

КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Л. В. Асмолова, Н. В. Анищенко Локационные датчики на плате «Сенсоры мехатроники» на базе образовательной платформы National Instruments.....	35
В. В. Бушер, О. В. Глазева Исследование нормальных и аварийных режимов работы судовых высоковольтных преобразователей частоты.....	40
А. В. Семиков Применение многофазного широтно-импульсного преобразователя с двумя накопителями электроэнергии в тяговом электроприводе электромобиля.....	47

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Б. В. Воробьев Энергоэффективный асинхронный электропривод электромобиля.....	52
О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, А. В. Дяченко, И. Т. Карплюк, С. В. Швец Анализ методов определения долевого участия субъектов в ответственности за нарушение качества электроэнергии по синусоидальности кривой напряжения.....	57
О. Ю. Лозинский, Я. Ю. Марущак, В. И. Мороз, Я. С. Паранчук Технологические особенности представления электрического режима дуговой сталеплавильной печи моделью смены состояний.....	63
Н. И. Муха, А. О. Дранкова, И. И. Красовский Экспериментальная установка для изучения и исследования энергоэффективных режимов электромеханических систем.....	67
Е. В. Сакун Компьютерное моделирование синхронизации скоростей в электроприводе электромобиля с упрощённой коробкой передач.....	72

ЮБИЛЕИ

Андриненко Пётр Дмитриевич.....	79
---------------------------------	----

C O N T E N T

SCIENCE AND EDUCATION

- V. B. Klepikov** To 90-th anniversary of the Automated electromechanical systems department of National technical university «Kharkiv polytechnical institute».....3

THEORETICAL ISSUES OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE

- V. V. Hrabko, O. V. Didushok** Mathematical model of detection of wear of a contact systems when switching a vacuum switch.....12

MODERN SYSTEMS OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE

- O. P. Chornyi, V. Yu. Nozhenko, V. K. Tytiuk, O. K. Danileyko** Study of starting a frequency-regulated electric drive of above resonance vibration machine.....19
- B. M. Tchunashvili, A. M. Petrosyan, T. G. Gamrekelashvili** Device control system for high harmonics created by three-phase electric arc furnaces.....26
- S. S. Mikhaykov** The load control device of the variable frequency drive on the basis of PLC.....30

COMPONENTS OF AN AUTOMATED ELECTRIC DRIVE

- L. V. Asmolova, M. V. Anishchenko** Location sensors on the board «Mechatronics sensors» on the basis of the National Instruments education platform.....35
- V. V. Busher, O. V. Glazeva** Research of high-voltage frequency converters in ship electric power systems.....40
- O. V. Semikov** The using of a multiphase pulse-width converter with two electric energy storage at a traction electric drive of an electric vehicle.....47

ENERGY EFFICIENCY OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

- B. V. Vorobiov** Energy efficient asynchronous electric drive of an electromobile.....52
- O. H. Hryb, G. A. Senderovich, O. V. Diachenko, I. T. Karpaliuk, S. V. Shvets** Analysis of methods of determination of partial participation of subjects in responsibility for violation of electricity quality on sinusoid current voltage.....57
- O. Y. Lozynskyi, Y. Y. Marushchak, V. I. Moroz, Y. S. Paranchuk** Technological peculiarities of the steel-melting furnace electric mode representation by state change model.....63
- M. Mukha, A. Drankova, I. Krasovskyi** The experimental installation for the study and research of electromechanical systems energy-efficient modes.....67
- Y. V. Sakun** Computer simulation of speed synchronization process in electric vehicle drive with simplified 2-speed gearbox.....72

ANNIVERSARIES

- Andrienko Petr Dmitrievich.....79

УКРАЇНСЬКА АСОЦІАЦІЯ ІНЖЕНЕРІВ-ЕЛЕКТРИКІВ

Українська Асоціація інженерів-електриків є всеукраїнською громадською організацією, діяльність якої спрямована на забезпечення інформацією з питань дослідження, розробки, виробництва, експлуатації систем промислового електропривода, їх компонентів і супровідної апаратури, а також оцінку пріоритетних науково-технічних напрямків розвитку автоматизованого електропривода.



Асоціація сприяє зацікавленим сторонам у наступних областях:

- розробка та впровадження нових науково-технічних рішень;
- проведення незалежної суспільної експертизи, оцінка науково-технічного рівня розробок, продукції та виробництва;
- видання наукових праць та інформаційних матеріалів;
- встановлення зв'язків з іншими асоціаціями та об'єднаннями, які мають спільні цілі та завдання з Асоціацією;
- оснащення сучасним електротехнічним устаткуванням навчальних лабораторій ВУЗів, які проводять підготовку фахівців в області електропривода.

С 1993 року Українська Асоціація інженерів-електриків щорічно проводить міжнародну науково-технічну конференцію “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”, збірка праць якої стала антологією електропривода в період с 1993 року і досьогодні.

Контакти

Адреса для листування: проф. Клепікову В.Б., кафедра АЕМС
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
бул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002

Телефони: +38 (057) 707-62-26, 707-69-74, 707-64-45
Факс: +38 (057) 707-62-26, 707-66-01
E-Mail: eeau@ukr.net, eeau@kpi.kharkov.ua
Сайт: <http://web.kpi.kharkov.ua/eeau/>

Банківські реквізити

Отримувач: Українська асоціація інженерів-електриків, м. Харків;
Розрахунковий рахунок: UA38351607000000026009010961,
МФО 351607, Код ЄДРПОУ 21683196;
Банк: ПАТ “Банк Грант”, м. Харків;
Система оподатковування: Неплатник ПДВ, неприбуткова організація (0006).

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА. ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА

Збірник наукових праць

№ 4 (1358) 2020

Науковий редактор: В. Б. Клепіков, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний редактор: В. М. Шамардіна, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: Л. В. Асмолова, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ», Україна

Верстка: О. А. Крохмальов, НТУ «ХПІ», Україна

Для верстки використано вільно розповсюджувані пакети LibreOffice та Scribus

Відповідальний за випуск В. П. Шайда, канд. техн. наук

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЙ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».

Кафедра «Автоматизовані електромеханічні системи»

Тел.: +38 (057) 707-62-26, 707-69-74, 707-64-45; E-Mail: eeau@ukr.net

Обл.-вид. № 2-20.

Підп. до друку 26.02.2020 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.

Друк цифровий. Гарнітура Liberation. Умов. друк. арк. 9,7. Облік.-вид. арк. 9,47.

Тираж 100 пр. Зам. № 23/06 . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул Кирпичова, 2

Виготовлювач: ФОП Панов А. М.

Свідоцтво серії ДК № 4847 від 06.05.2015 р.
61002, м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф. 6,
Тел. +38 (057) 714-06-74, E-Mail: copy@vlavke.com