МАТЕРІАЛИ ПРИЙМАЮТЬСЯ ЗА АДРЕСОЮ:
КАФЕДРА «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ» НТУ «ХПІ»,
ВУЛ. КИРПИЧОВА,2, М. ХАРКІВ, 61002, УКРАЇНА

ЕЛЕКТРОННІ ВАРІАНТИ МАТЕРІАЛІВ ПО E-MAIL: elmaepe.visn.khpi@gmail.com

ЛИСТУВАННЯ ПО E-MAIL: mvikemkpi@gmail.com
ele6780@gmail.com

ДОВІДКИ ЗА ТЕЛЕФОНАМИ: (057) 707-65-14 МІЛИХ ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ
(057) 707-68-44 ЮР'ЄВА ОЛЕНА ЮРІЇВНА

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ РОЗМІЩЕНІ НА САЙТІ НТУ «ХПІ» -
КАФЕДРА «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ» - РОЗДІЛ «НАУКОВА ДІЯЛЬНІСТЬ»
HTTP://WEB.KPI.KHARKOV.UA/ELMASH/

ISSN 2409-9295

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

1885
«ХПІ»

ВІСНИК

Національного технічного університету «ХПІ»

Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії

№ 5'2018

Харків
2018

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 НТУ «Харківський піолтехнічний інститут». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії

№ 5 (1281) 2018

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Bulletin of the NTU "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion

No. 5 (1281) 2018

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv
NTU "KhPI", 2018

Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Серія: Електричні машині та електромеханічне перетворення енергії = Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2018. — № 5 (1281) 2018. — 125 с. — ISSN 2409-9295.

Видання присвячене освітленню досягнень в електромеханіці, електричних машинах, трансформаторах, електромеханічних перетворювачах енергії. Публікуються статті, що стосуються досліджень з електромеханіки, класичних та спеціальних електричних машин і трансформаторів.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі електромеханіки.

The publication is devoted to the coverage of achievements in electromechanics, electric machines, transformers, electromechanical energy converters. Published articles related to research on electromechanics, classical and special electric machines and transformers.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of electromechanics.

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

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машині та електромеханічне перетворення енергії *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 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року».*

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: **Електричні машині та електромеханічне перетворення енергії** включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричних базах **Российский Индекс Научного Цитирования – РИНЦ, Google Scholar і включений у довідник періодичних видань бази данних Ulrich'sPeriodicals Directory (New Jersey, USA), внесено до електронного архіву наукових періодичних видань України у бібліотеці імені В.І. Вернадського**

Офіційний сайт видання: http://web.kpi.kharkov.ua/elmash/visnik/

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор
Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна
Заст. 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:
Мілих В. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар:
Юр'єва О. Ю., доц., НТУ «ХПІ», Україна
Члени редколегії:
Болюх В. Ф., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Веприк Ю. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Загірняк М. В., проф., Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна
Клименко Б. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Мазуренко Л. І., проф., Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Україна
Шинкаренко В. Ф., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна
Плюгін В. Є., проф., Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна
Яровенко В. О., проф., Одеський національний морський університет, Україна
Штаманн М., науковий співробітник, др.-інж., Магдебурзький університет імені Отто фон Геріке, Німеччина
Паліс С., проф., др.-інж., Магдебурзький університет імені Отто фон Геріке, Німеччина

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:
Milykh V. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Executive secretary:
Yurieva O. Yu., as. prof., NTU "KhPI", Ukraine
Editorial staff members:
Bolyukh V. F., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Veprik Yu. N., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Zagirnyak M., prof., Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine
Klimenko B. V., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Mazurenko L. I., prof., Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine
Shynkarenko V. F., prof., National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
Gamayun I. P., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Pliugin V. E., prof., O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine
Yarovennko V. O., prof., Odessa National Maritime University, Ukraine
Stamann M., scientific Assistant, Dr. Ing., Otto von Guericke University of Magdeburg, Chair of Electric Drive Systems, Germany
Palis S., Prof. Dr. Ing., Otto von Guericke University of Magdeburg, Institute for Automation Engineering, Germany

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 2 від 23 лютого 2018 р.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2018

СТОРІНКА РЕДАКТОРА

Серія "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії" Віснику НТУ «ХПІ» виходить ось вже п'ятий раз. Наявні номери журналу можна подивитися на сайті кафедри електричних машин за посиланням http://web.kpi.kharkov.ua/elmash (наукова діяльність). Зрозуміло, що це ще і не вік, але ж таки – «мініювілей»!

Хочеться зрозуміти і розповісти – чи вдалася ця серія, чи на правильному вона шляху?

І тут на перший план виходить статистика.

Спочатку загальний огляд – скільки і звідкіля надходять і публікуються статті у нашій серії.

У п'яти номерах журналу опубліковано 90 наукових статей, а за роками: 2014 рік – 17 статей, 2015 – 16, 2016 – 18, 2017 – 22, 2018 – 17. За кількістю статей лідерами є Харків – 31 стаття, Київ – 28 та Одеса –13.

А усього статті надходили з одинадцяті міст України і одного – Росії, і це: Алчевськ, Дніпро, Запоріжжя, Кам'янське (Дніпродзержинськ), Київ, Кременчук, Львів, Миколаїв, Одеса, Сєвєродонецьк, Харків та Курськ. Саме ці міста, де в Україні розвинуті електротехніка та електромеханіка і, зокрема, електричні машини.

А у цих містах це стосується таких відомих і шановних навчальних і наукових закладів та підприємств, як Донбаський державний технічний університет, Дніпровський (Дніпродзержинський) державний технічний університет, Запорізький національний технічний університет, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київський національний університет технологій та дизайну, Кременчуцький національний університет, Миколаївський національний аграрний університет, Національний авіаційний університет України, Національний аерокосмічний університет, Національний гірничий університет, Національний університет біоресурсів та природокористування України, Національний університет «Львівська політехніка», Національний університет кораблебудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Одеська національна морська академія, Одеський національний морський університет, Одеський національний політехнічний університет, Харківська національна академія міського господарства, Юго-западный технический университет (м. Курськ), Інститут електродинаміки НАН України, Акціонерна компанія "Харківобленерго", ДП «КБ «Південне», ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», ПАТ «Електромашина», ТОВ «Електротехніка – Нові технології», ТОВ «Енергоавтоматизація» та ПАТ «Євродін».

Географія і наші партнери, безумовно, дуже важливі і показові. Але ж «обличчя» журналу створюють, у першу чергу, автори та їхні статті. І якщо оцінка наукового рівня статей – це доволі суб'єктивна і неоднозначна справа, то за якісний рівень авторів свідчить їхній статус, який вони заслужили своєю працею, і оцінені державою, навчальними закладами, науковими установами та підприємствами.

Тому представимо з різних боків у кількісній формі якісний склад авторів статей в нашому журналі.

Усього у зазначених дев'яноста статях присутні 129 авторів та співавторів.

Серед них мають вчений ступінь доктора технічних наук 22, і вони фігурують у 65 статтях, тобто можна сказати, що 72 % статей мають докторський рівень. До авторського складу входять також 62 кандидата технічних, а іноді і фізико-математичних, наук. На додаток до вченого ступеню 14 з них мають вчене звання професор, 44 – доцент, 5 – старший науковий співробітник. Один зі співавторів є Членом-кореспондентом НАН України.

І якщо градація вчених ступенів та звань є досить вузькою, то з точки зору посад автори мають дуже широкий спектр. Серед них є ректор, проректор, декан, 10 завідувачів кафедр, 12 професорів, 38 доцентів, 6 завідувачів відділів, 3 провідних і 5 старших наукових співробітників, 3 головних конструктора і один головний електронік, заступник директора і навіть засновник підприємства. Компанію ним складають ще старші викладачі, асистенти, наукові й молодші наукові співробітники, докторант, здобувач, аспіранти, заступники завідувачів відділів, завідувач сектору, інженери різних категорій, менеджер, старший диспетчер і студенти.

Зазначені професіонали і ті, хто ще має ними стати, мають у нашому журналі від однієї і більше статей. Але серед них вже сформувалося ядро – основа авторського колективу журналу. До цих поважних вчених, які написали та опублікували свої статті в усіх п'яті номерах журналу, належать д.т.н., проф. Болюх Володимир Федорович (НТУ «ХПІ»), д.т.н., проф. Васьковський Юрій Миколайович (НТТУ «КПІ»), к.т.н., доцент Гераскін Олександр Анатолійович (НТТУ «КПІ»), п.н.с., д.т.н. Гребеніков Віктор Володимирович (ІЕД НАНУ), к.т.н., доц. Щукін Ігор Сергійович (НТУ «ХПІ»). До них можна віднести і зав. каф., д.т.н., проф. Ставинського Андрія Андрійовича (МНАгрУ), який також має 5 статей, хоча і пропустив один випуск.

Але усіх перевершив спочатку студент, а потім аспірант Єноктаєв Ростислав Миколайович (ОНПУ), який є автором або співавтором 6 статей.

Рекордсменом же став автор цих рядків, тому що опублікував 8 статей.

Таким чином, можна констатувати, що журнал після народження у 2014 році вижив и почав нормально розвиватися. А як він продовжить життя, і як часто буде виходити у світ, у першу чергу залежить від його авторів. Бо без достатньої кількості їхніх статей не може сформуватись жоден черговий номер.

Тому невеликий випусковий колектив ентузіастів кафедри електричних машин НТУ «ХПІ», яка курирує і випускає серію "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії" Віснику НТУ «ХПІ», запрошує вже знайомих та нових авторів до співпраці. Пишіть, будь ласка, та надсилайте свої статті, і вони будуть жити разом з вами і нами на сторінках нашого спільного журналу!

УДК 621.313

В. И. МИЛЫХ, С. Е. ДЗЕНИС

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ЗАЗОРА ПОД ГЛАВНЫМИ ПОЛЮСАМИ В ДВИГАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Проведений чисельно-польовий аналіз ефективності ексцентриситету проміжку під головними полюсами в двигуні постійного струму з послідовним збудженням. При зміні ексцентриситету і власне проміжку порівнюються електромагнітні параметри двигуна і розподіл магнітної індукції в активній зоні. Зменшення ексцентриситету і проміжку не призводить до критичного підвищення магнітної індукції під краями головного полюса через реакцію якоря. Тому загрози збільшення максимуму міжламельної напруги на колекторі не очікується.

Ключові слова: двигун постійного струму, головний полюс, ексцентриситет проміжку, магнітне поле, чисельні розрахунки, магнітна індукція, електромагнітні параметри, ефективність.

Проведен численно-полевой анализ эффективности эксцентриситета зазора под главными полюсами в двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением. При изменении эксцентриситета и самого зазора сравниваются электромагнитные параметры двигателя и распределение магнитной индукции в активной зоне. Уменьшение эксцентриситета и зазора не приводит к критическому повышению магнитной индукции под краями главного полюса из-за реакции якоря. Поэтому угрозы увеличения максимума межламельного напряжения на коллекторе не ожидается.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, главный полюс, эксцентриситет зазора, магнитное поле, численные расчеты, магнитная индукция, электромагнитные параметры, эффективность.

A numerical-field analysis of the eccentricity efficiency of the gap under the main poles in a DC motor with series excitation is carried out. With a change in the degree of eccentricity and the gap itself, the electromagnetic parameters of the motor and the distribution of magnetic induction in the gap and in the tooth-slot layer are compared. The research is carried out using the example of a 60 kW four-pole DC motor. The elimination of the eccentricity of the gap and its reduction in comparison with the basic design of the DC motor does not lead to a critical redistribution of the magnetic field in the core of the engine. This means that there is no excessive increase in magnetic induction under the edges of the main pole tip due to the reaction of the armature. Therefore, there is no threat of an increase in the local maximum of interlamel voltage on the collector. Consequently, it is possible to improve the efficiency of the DC motor. The use of identified reserves in the selection of the gap below the main poles will lead to a slight increase in the magnetic flux and the DC motor electromagnetic moment. The results of the analysis make it possible to improve the technique for designing DC machines.

Keywords: DC motor, main pole, gap eccentricity, magnetic field, numerical calculations, magnetic induction, electromagnetic parameters, efficiency.

Введение. Принцип действия электрических машин (ЭМ), в том числе и машин постоянного тока (МПТ), основан на взаимодействии магнитных полей [1, 2]. Обоснование важнейших явлений – индуктирования ЭДС в обмотках и силовых действий базируется, как правило, на магнитных полях в зазоре между индуктором и якорем, роли которых в МПТ играют статор и ротор. При этом одной из ключевых расчетных величин является магнитная индукция (МИ).

В классической системе проектирования ЭМ величина МИ в зазоре определяется методом магнитной цепи [3], а форма ее распределения принимается умозрительно с использованием имеющегося опыта экспериментальных исследований. Это распределение «сглаживается», а наличие зубцов сердечников учитывается в расчетах специальными коэффициентами.

В большинстве случаев расчеты магнитного поля ограничиваются рассмотрением действия одной из обмоток, например, индуктора – это общепринятый режим холостого хода (ХХ). В режиме нагрузки, в котором и происходят основные процессы в ЭМ, при действии всех обмоток расчеты магнитных полей в зазоре методом магнитной цепи, как правило, не удаются ввиду чрезмерной сложности и невысокой точности из-за серьезных допущений.

Отказаться от ряда допущений, влияющих на результаты расчета магнитных полей в ЭМ, позволяют численные методы в сочетании с современным компьютерным программным обеспечением [4-6].

Постановка задачи. В Украине и, в частности, Харькове традиционно производятся электрические машины (ЭМ) классических типов, в том числе и двигатели постоянного тока (ДПТ). Для обеспечения спроса на них необходимо их постоянное совершенствование. В условиях жесткой конкуренции на рынке ЭМ и, соответственно, лимита времени, актуальной является эффективная система проектирования, которая позволяет создавать новые образцы ЭМ быстро и практически без длительной опытной их доводки.

Эффективным решением такой проблемы может быть использование численных методов расчета магнитных полей. Они позволяют учитывать достаточно точно реальную геометрию устройств и нелинейные магнитные свойства ферромагнитных сердечников. Для таких целей широкое распространение получила программа FEMM [5], основанная на методе конечных элементов и ориентированная на расчет двухмерных полей. Этого достаточно для ряда ЭМ классической конструкции [1-3]. Но в МПТ, имеющих разные аксиальные длины сердечников, без учета этого фактора получить адекватные результаты расчета магнитных полей в чисто двухмерной постановке не удается [7].

К проблемам использования программы FEMM относится также то, что много времени тратится на формирование *геометрических моделей*, отображающих конструкцию ЭМ, и *физических моделей*, отображающих магнитные свойства материалов и токовые параметры обмоток, а также на извлечение получаемых результатов расчетов и преобразование их в форму, пригодную для дальнейшего использования в процессе проектирования и исследования ЭМ.

Проблемы затрат времени расчетчиков становят-

© В. И. Милых, С. Е. Дзенис, 2018

ся еще более серьезными при многовариантных расчетах ЭМ, в случаях варьирования их геометрией, размерами, токами, положением подвижных частей.

Обусловленные проблемы можно преодолеть автоматизацией построения геометрических и физических моделей ЭМ, расчетов и перебора параметров, а также извлечения, обработки и приведения результатов в необходимую форму. Такие возможности пользователям программы FEMM предоставляет интегрированный в нее алгоритмический язык Lua. И задача теперь заключается в написании соответствующего комплекса программ (*скриптов*). Эта задача является весьма сложной, так как требует владения знаниями в областях ЭМ, программирования и теории магнитных полей. Но решение этой задачи вполне оправдано, так как программа пишется один раз, а используется множество раз и любым количеством пользователей.

Для обеспечения высокой эффективности расчетов МП и электромагнитных параметров в среде FEMM разработан комплекс скриптов Lua для турбогенераторов [8] и трехфазных асинхронных двигателей [9]. Эти программы позволяют многократно повысить производительность расчетчиков и при этом еще обеспечить возможность получения широкого спектра параметров и характеристик, в том числе таких, которые практически недоступны при классических методах проектирования или даже в «ручном» режиме работы с программой FEMM. Требованиями к таким скриптам является универсальность с точки зрения возможного варьирования геометрией и размерами проектируемых ЭМ – при минимуме вводимой исходной информации – и только в числовой форме.

Учитывая имеющийся стабильный спрос в Украине и за рубежом на харьковские ДПТ, авторами разработан аналогичный скрипт для автоматизированного построения их физико-геометрических моделей, и расчетов магнитных полей, электромагнитных параметров и характеристик ДПТ. Этот скрипт достаточно универсален и позволят оперировать рядом ДПТ с характерными их конструкциями в диапазоне мощностей от единиц до десятков и выше киловатт.

Введение этого скрипта в процесс проектирования МПТ позволяет по-новому взглянуть не некоторые стороны этого процесса.

Целью данной работы является представление принципов и результатов численно-полевого анализа эффективности эксцентриситета зазора под главными полюсами в ДПТ последовательного возбуждения. Как известно, этот эксцентриситет делается для ослабления влияния реакции якоря на основное магнитное поле машины с целью препятствования недопустимого роста межламельного напряжения на коллекторе в режиме нагрузки. В классической теории МПТ оценка этого, а также определение тока возбуждения при переходе от ХХ к режиму нагрузки делаются на основании весьма приближенного подхода.

Основой представляемого исследования являются численные расчеты магнитных полей по программе FEMM с ее усовершенствованием для учета разнородных аксиальных длин сердечников [7] и под управлением ею созданным скриптом Lua. Последнее «развязало руки» исследователям при выполнении многовариантных расчетов магнитных полей, а также при обработке и выдаче очень значительного объема получаемой информации. Это практически было трудно преодолимым препятствием при чисто «ручной» работе с программой FEMM, несмотря на заложенную в ней самой и ее интерфейсе эффективность.

Объект исследования. Для расчетного анализа взят четырехполюсный ДПТ мощностью 60 кВт с последовательным возбуждением, который рассчитан на номинальные напряжение U_N=340 В и ток I_N=197 А. Он имеет число пар полюсов p=2, наружные радиусы станины r_{se}=0,195 м и сердечника ротора–якоря r_{re}=0,101 м, воздушный зазор под центром сердечника главного полюса (СГП) δ_g=1,9 мм; активную длину l_a=0,23 м; число пазов ротора Q_r=33. Двухслойная волновая обмотка якоря имеет число пар параллельных ветвей a=1 и число активных проводников N_c=198. Число витков (на полюс) обмотки возбуждения N_p=15 и обмотки добавочных полюсов N_d=15.

Конструкторская расчетная модель электромагнитной системы ДПТ в его поперечном сечении изображена на рис. 1.

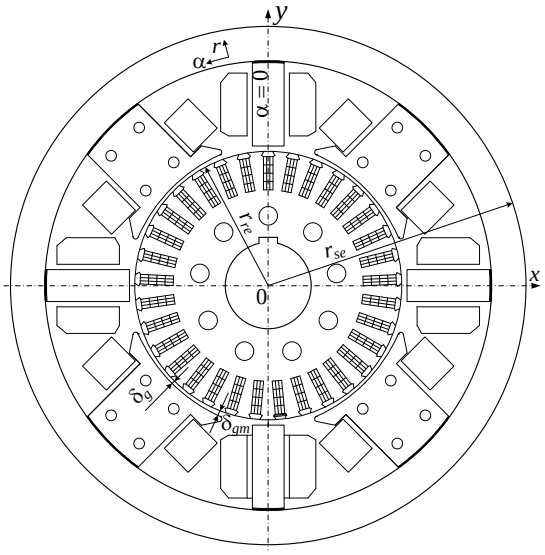


Рис. 1 – Конструкторская модель электромагнитной системы ДПТ в его поперечном сечении

Эксцентриситет зазора под СГП обеспечивается отличием радиуса расточки СГП r_p от радиуса поверхности сердечника ротора r_{re}, что показано на рис. 2. В базовой конструкции ДПТ задано r_p=122 мм, что дало максимальный зазор на краю наконечника СГП δ_{gm}=3,41 мм.

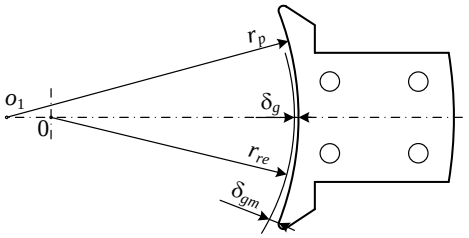


Рис. 2 – Образование эксцентриситета зазора под СГП

Принято, что в расчетной модели ДПТ (рис. 1) по осям x и y располагаются оси сердечников добавочных полюсов (СДП). Кроме прямоугольной системы координат x, y используется полярная система r, α и угол α отсчитывается от вертикальной оси.

В отличие от конструкторской модели (рис.1) в сформированной для расчетов физико-геометрической модели по оси верхнего СДП расположили зубец сердечника ротора, что является более удобным для нумерации пазов и проводников в пазах, которая ведется от верхней полуоси *y*.

Обусловленные позиции зубца и СДП вместе с заданной системой направлений токов в обмотках обеспечивает позиции всех остальных элементов конструкции ДПТ. Сформированная так физико-геометрическая модель ДПТ представлена на рис. 3. Именно она и воспринимается программой FEMM и делается определенной посредством ввода необходимого комплекта данных из файла исходной информации. Это делается автоматически составленным скриптом Lua, аналогичным скриптам для турбогенераторов и трехфазных асинхронных двигателей [8, 9].

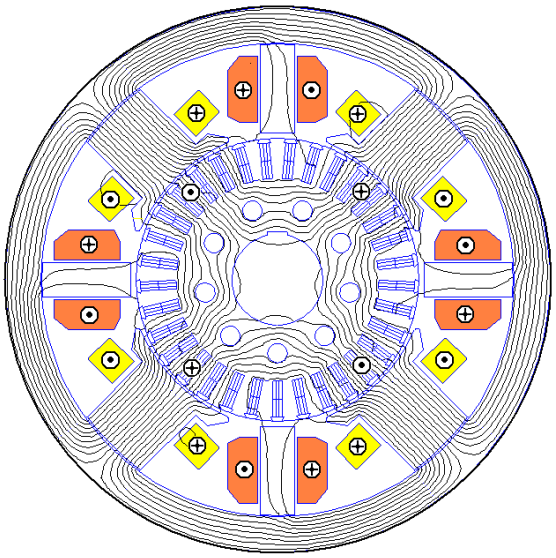


Рис. 3 – Физико-геометрическая модель ДПТ с картиной магнитного поля в режиме нагрузки

Общие принципы расчета магнитных полей.

В поперечном сечении ДПТ (рис. 1) магнитное поле описывается общеизвестным дифференциальным уравнением

$$\mathrm{rot}\left[\frac{1}{\mu}\mathrm{rot}\left(\vec{k}\,A_z\right)\right]=\vec{k}\,J_z\,, \qquad (1)$$

где A_z, J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; $\vec{k}$ – орт по аксиальной оси *z*; μ – абсолютная магнитная проницаемость, которая для ферромагнитных сердечников определяется по их кривой намагничивания.

На внешней поверхности станины принимается условие Дирихле: A_z=0. Численный расчет магнитного поля проводится методом конечных элементов, как отмечалось, по общедоступной программе FEMM [5].

Одной из базовых величин магнитного поля, которые принято анализировать, является МИ, вычисляемая по распределению ВМП на основе общего выражения $\vec{B}=\mathrm{rot}(\vec{k}\,A_z)$. Исходя из этого, например, в полярных координатах составляющие и модуль МИ:

$$B_r=\frac{\partial A_z}{r\,\partial\alpha};\quad B_\alpha=-\frac{\partial A_z}{\partial r};\quad B=\sqrt{B_r^2+B_\alpha^2}. \qquad (2)$$

В шихтованных сердечниках программа FEMM «выдает» значения МИ, «размазанные» на всю их аксиальную длину. Чтобы получить МИ непосредственно для стальных листов, надо делить эти значения на коэффициент заполнения сердечника сталью.

Как уже отмечалось, важным и необходимым при расчете магнитного поля по программе FEMM является учет разнородных длин сердечников ДПТ. Эта разнородная структура представлена на рис. 4 продольными сечениями по осям главного и добавочного полюсов, где обозначены номера и соответствующие аксиальные длины участков магнитопровода.

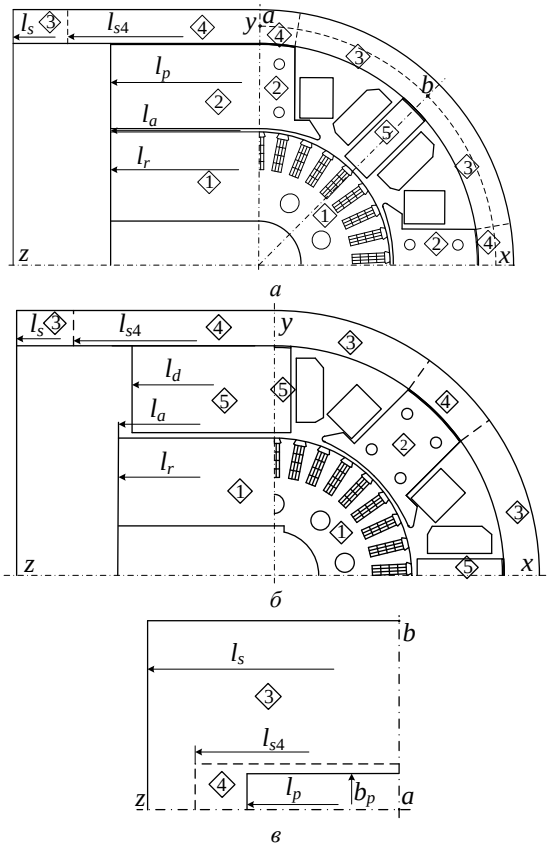


Рис. 4 – Продольно-поперечная расчетная модель ДПТ:
а – продольное сечение по оси главного полюса;
б – продольное сечение по оси добавочного полюса;
в – вид на поверхность станины и торец СГП
(симметричная четверть модели)

Учет разнородности аксиальных длин участков проводится по методике, изложенной в [10] и интерпретированной применительно к программе FEMM в [7]. В данном случае, как и в [7], это заключается в следующем.

При расчете магнитного поля в поперечном сечении ДПТ учет различных аксиальных длин проводится корректировкой задаваемых магнитные свойства локальных зон этого сечения.

В качестве таких зон на рис. 4 выделены участки магнитопровода 1-5. Кроме участков 1-3, 5, соответствующих конкретным сердечникам, выделен еще один

под номером 4 в станине в зоне над торцом СГП, его аксиальная длина в первом приближении:

$$l_{s4}=(l_p+l_s)/2 \quad (3)$$

Для каждой зоны принимается определенная аксиальная длина l_k (здесь и далее индекс k означает номер зоны) и определяется коэффициент приведения

$$K_{l,k} = l_k / l_a \quad (4)$$

к некоторой базовой длине, в качестве которой принята активная длина ДПТ по зазору, определяемая по длинам прилегающих участков – сердечников главного полюса и ротора, а именно:

$$l_a = (l_p + l_r)/2 . \quad (5)$$

Перечень зон-участков в соответствии с рис. 4 представлен в табл. 1 и здесь же даны формулы определения их коэффициентов приведения на основе (4).

Таблица 1 – Представление участков магнитопровода ДПТ с разными аксиальными длинами

Номер участка	Название участка	Коэффициент приведения
1	Сердечник ротора	$K_{lar}=l_r/l_a$
2	Сердечник главного полюса	$K_{lap}=l_p/l_a$
3	Станина основная	$K_{las}=l_s/l_a$
4	Участок станины над СГП	$K_{las4}=l_{s4}/l_a$
5	Сердечник добавочного полюса	$K_{lad}=l_d/l_a$

В зонах с линейными магнитными свойствами, характеризующимися исходным значением абсолютной магнитной проницаемости μ_k, необходимо задавать ее приведенное значение

$$\mu_{c,k} = \mu_k \cdot K_{l,k} . \quad (6)$$

Для ферромагнитных сердечников, характеризующихся определенной кривой намагничивания $B(H)$, необходимо шкалу МИ B изменить применительно к каждой выделенной зоне так:

$$mB_c = mB \cdot K_{l,k} , \quad (7)$$

где mB, mB_c – масштабы по шкале МИ исходной и приведенной кривых намагничивания. Шкала напряженности магнитного поля H сохраняется.

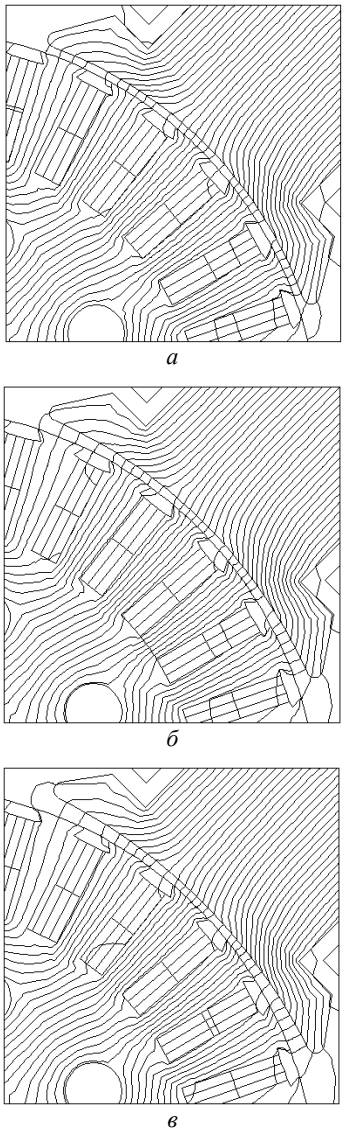
С заданными таким образом магнитными свойствами материалов проводится расчет магнитного поля по программе FEMM в соответствии с ее инструкцией. Все полученные в результате расчета значения полевых параметров (ВМП $A_{z,c}$, МИ B_c и т.д.) будут соответствовать приведенной расчетной модели с единой аксиальной длиной l_a.

Вернуться к исходной модели с разнородными аксиальными длинами надо опять с использованием коэффициента приведения, например, для ВМП и МИ:

$$A_z = \frac{A_{z,c}}{K_{l,k}}; \qquad B = \frac{B_c}{K_{l,k}} . \quad (8)$$

В режиме номинальной нагрузки для базового варианта конструкции ДПТ картина магнитного поля для приведенной расчетной модели в виде силовых линий представлена на рис. 3.

Более детализированный фрагмент этой картины при базовом варианте зазора показан на рис. 5, *б* в зоне зазора с прилегающими зубцово-пазовой структурой ротора и наконечниками сердечников полюсов. На рис. 5, *а* и *в* представлены картины магнитного поля при отсутствии и увеличении эксцентриситета зазора под СГП, соответственно. Размерные данные разных расчетных моделей ДПТ и сравниваемые их параметры представляются далее.



а

б

в

Рис. 5 –Фрагмент картины магнитного поля при разных вариантах зазора под СГП

Теоретическая база для расчета сравниваемых параметров ДПТ при анализе эффективности эксцентриситета зазора под СГП.

Эффективность эксцентриситета зазора определяется через сравнение электромагнитных и энергетических параметров, определяемых соответственно [1-3] и [6] по результатам расчета магнитного поля программой FEMM по представленной методике.

Первоосновой этого является полученное в поперечном сечении ДПТ (рис. 3) распределение ВМП. Через него получаются в наглядной форме картины магнитного поля (рис. 3, рис. 5), а также на основе (2) и (8) координатные распределения МИ, которые для сравниваемых вариантов представляются далее.

Магнитный поток, пронизывающий какой либо контур в ДПТ, при двухмерной структуре магнитного поля определяется достаточно просто по формуле:

$$\Phi = \left(A_{z,1} - A_{z,2}\right) l_a , \quad (9)$$

где A_{z1}, A_{z2} – значения ВМП в двух точках, через которые проходят аксиальные боковые стороны контура; l_a – упоминавшаяся уже аксиальная длина приведенной расчетной модели ДПТ.

Конкретно, использовался магнитный поток Φ_a, входящий с сердечник якоря, который определяется по (9), причем точки 1 и 2 брались на его поверхности по осям СДП. Результат определялся как среднее значения магнитного потока на четырех полюсных делениях ДПТ.

Из уравнения равновесия напряжений в двигательном режиме МПТ определяется ЭДС обмотки якоря МПТ:

$$E_a = U_a - I_a R_{as} - 2 \cdot \Delta U_{br} , \quad (10)$$

где U_a, I_a – напряжение на входных зажимах всей якорной цепи и ее ток; ΔU_{br} – падение напряжения в щеточно-коллекторном контакте на один щеточный бракет; $R_{as} = R_a + R_d + R_p$ – суммарное сопротивление якорной цепи при расчетной температуре, которое при последовательном возбуждении складывается из сопротивлений обмоток якоря R_a, добавочных полюсов R_d и возбуждения R_p.

Частота вращения выражается формулой, об/мин:

$$n_r = \frac{E_a}{C_E \Phi_a} . \quad (11)$$

где $C_E = \frac{pN_c}{60a}$ – конструктивная постоянная ДПТ для ЭДС обмотки якоря.

Электромагнитный момент якоря (ЭММ):

$$M_{em} = C_M \Phi_a I_a , \quad (12)$$

где $C_M = \frac{p\,N_c}{2\pi a}$ – конструктивная постоянная ДПТ для ЭММ.

Потребляемая из питающей сети электрическая мощность (здесь и далее все мощности и потери в Вт):

$$P_{in} = U_a I_a . \quad (13)$$

Выходная механическая мощность, отдаваемая с вала ротора:

$$P_{out} = P_{in} - \Delta P , \quad (14)$$

где ΔP – потери мощности, состоящие из ряда составляющих:

$$\Delta P = P_{el} + P_{mag} + P_{mec} + P_E + P_{ad} . \quad (15)$$

Эти составляющие определяются следующим образом.

Электрические потери в цепи тока якоря:

$$P_{el} = P_{el\,a} + P_{el\,d} + P_{el\,p} + P_{el\,br} , \quad (16)$$

где $P_{el\,a} = R_a I_a^2$, $P_{el\,d} = R_d I_a^2$, $P_{el\,p} = R_p I_p^2$ – потери в обмотках якоря, добавочных полюсов и возбуждения; $P_{el\,br} = 2 \cdot \Delta U_{br} I_a$ – потери в щеточно-коллекторных контактах.

Магнитные потери мощности в сердечнике якоря $P_{mag} = P_{magta} + P_{magya}$, вызываемые его перемагничиванием с частотой

$$f_a = \frac{p\,n_r}{60} , \quad (17)$$

складываются из соответствующих потерь в зубцах P_{magta} и спинке сердечника якоря P_{magya} и вычисляются по эмпирической формуле:

$$P_{magFe} = K_{mag}\ \ p_{1,0/50} \left(\frac{f_a}{50}\right)^{1,5}\ \ m_{Fe}\ \ B_{Femid}^2 , \quad (18)$$

где $p_{1,0/50}$ – удельные потери (Вт/кг) в стали при МИ 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц, которые берутся из справочных данных для конкретной стали;

m_{Fe} – масса соответствующей части ферромагнитного сердечника, кг;

B_{Femid} – среднее значение амплитуды МИ в сердечнике, Тл;

K_{mag} – коэффициент магнитных потерь, определяемый опытным путем и зависящий от технологии штамповки стальных листов, сборки их в пакет и др. (в данном случае было принято K_{mag} =2,3).

В (18) вместо величин m_{Fe} и B_{Femid} для расчета магнитных потерь в зубцах и спинке якоря берутся соответствующие им массы m_{ta} и m_{ya}, и значения МИ B_{tamid} – в среднем сечении зубца; B_{ya} – в спинке якоря.

Механические потери мощности складываются из составляющих:

$$P_{mec} = P_{mecbe} + P_{mecbr} + P_{ven} + P_{air} , \quad (19)$$

где P_{mecbe}, P_{mecbr} – потери на трение в подшипниках и щеток о коллектор; P_{ven} – вентиляционные потери (потребляемая мощность вентилятора, который продувает воздух для охлаждения машины), P_{air} – на трение подвижных частей о воздух.

Достаточно адекватным является вычисление потерь мощности на трение щеток о коллектор:

$$P_{mecbr} = 9{,}81 \cdot k_m S_{brs} \cdot p_{br} v_c , \quad (20)$$

где k_m – коэффициент трения щеток о коллектор, находящийся в пределах 0,2–0,3 в зависимости от марки щеток; можно принять среднее значение 0,25;

окружная скорость коллектора (м/с):

$$v_c = \frac{\pi\, d_c\ n_r}{6 \cdot 10^4} , \quad (21)$$

где d_c – диаметр коллектора (мм); p_{br} – удельное давление на щетку, равное в среднем 0,2 кГ/см^2;

площадь контакта всех комплектов щеток (мм^2), определяемая по формуле:

$$S_{brs} = 2p\ \ n_b\ \ b_b\ \ l_b \cdot 10^{-2} ,$$

где n_b – число щеток одного бракета; b_b, l_b – ширина и длина щетки, соответственно (мм).

Формул для расчета остальных составляющих механических потерь даже такого уровня точности,

как для предыдущих потерь, нет. В практике проектирования МПТ используются эмпирические формулы, либо формулы по экспериментально полученным графическим функциям.

В данной работе остальные составляющие механических потерь мощности из (19) определялись в наиболее достоверной форме на основе экспериментальных исследований двигателя-аналога, полученные при его частоте вращения n_{an}, а именно:

общие потери на вентиляцию и трение о воздух:

$$P_{mecvenair} = \left[P_{mecan} - \left(P_{bearan} + P_{mecban}\right)\right] \left(\frac{n_r}{n_{an}}\right)^3 ; \quad (22)$$

потери на трение в подшипниках:

$$P_{mecbea} = P_{bearan} \frac{n_r}{n_{an}} , \quad (23)$$

где представлены механические потери мощности двигателя-аналога: P_{mecan} – суммарные, P_{bearan} – в подшипниках, P_{mecban} – на трение щеток о коллектор.

Тогда суммарные механические потери мощности исследуемого ДПТ при его частоте вращения n_r :

$$P_{mec} = P_{mecvenair} + P_{mecbea} + P_{mecbr} . \quad (24)$$

Добавочные потери мощности в ДПТ рассматриваемого типа могут составлять до 1% от подводимой мощности и определяются по формуле:

$$P_{ad} = 0{,}01 \cdot \frac{P_N}{\eta_N} , \quad (25)$$

где P_N , η_N – его номинальная мощность и КПД.

Из численно-полевого расчета получается электромагнитный момент (ЭММ), определяемый через тензор магнитного натяжения Максвелла [5, 6]:

$$M_{emT} = \frac{l_a}{\mu_0 (r_s - r_r)} \int_{S_\delta} B_r B_\alpha r dS , \quad (26)$$

где B_r и B_α – радиальная и угловая составляющие МИ; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; r_r и r_s – радиусы окружностей, ограничивающих поперечную площадь зазора S_δ со стороны ротора и полюсов (в скрипте Lua есть конкретная программная процедура, которая обеспечивает вычисление M_{emT}).

Этот ЭММ является аналогом ЭММ по (12). Тогда электромагнитная мощность, может определяться либо через M_{em}, либо через M_{emT}, а именно:

$$P_{emM} = \frac{\pi n_r M_{emT}}{60} \quad (27)$$

И в этом случае выходная мощность ДПТ, в отличие от (14), получается за вычетом потерь мощности в роторе, то есть:

$$P_{out} = P_{emM} - P_{mag} - P_{mec} - P_{ad} , \quad (28)$$

где даны уже рассмотренные потери мощности.

Сравнительный анализ магнитных полей и электромагнитных параметров ДПТ при варьировании зазора под СГП.

Первый цикл варьирования зазора заключался в изменении радиуса расточки наконечника СГП r_{p1} и соответствующем изменении зазора на краях наконечника δ_{gm} (рис. 1 и рис. 2). При этом зазор под серединой СГП δ_g оставался неизменным (1,9 мм), а напряжение U_a и ток I_a якорной цепи были равны заданным номинальным значениям.

Данные расчетов для пяти рассмотренных вариантов эксцентриситета зазора *ex*δ1-*ex*δ5 представлены в табл. 2, причем вариант *ex*δ3 соответствует базовой конструкции ДПТ (рис. 1), а вариант *ex*δ1 – равномерному зазору. Фрагменты картин магнитного поля, уже показанные на рис. 5, соответствуют вариантам *ex*δ1, *ex*δ3 и *ex*δ5 из этой таблицы.

Таблица 2 – Сравнение параметров ДПТ при разном эксцентриситете зазора под главными полюсами

Вариант	r_{p1}, мм	δ_{gm}, мм	Φ_a, Вб	M_{em}, Н·м	n_r, об/мин	P_{out}, кВт	M_{emT}, Н·м
*ex*δ1	103,4	1,95	18,50	229,7	2594	59,73	227,6
*ex*δ2	112,7	2,75	17,95	222,9	2673	59,66	220,7
*ex*δ3	122,0	3,41	17,52	217,5	2739	59,60	215,1
*ex*δ4	131,3	3,97	17,15	213,0	2798	59,55	210,9
*ex*δ5	140,6	4,45	16,85	209,2	2848	59,51	206,8

Диапазон изменения зазора на краю наконечника δ_{gm} составил 131,6% от δ_g, а изменение эксцентриситета зазора $(\delta_{gm}-\delta_{g0})/\delta_{g0}$ – от 0,026 до 1,34 о.е.

Изменение магнитного потока Φ_a и электромагнитного момента составило 9,4%, частоты вращения n_r – 9,3%, выходной мощности – на 0,37%; электромагнитного момента через ТМН M_{emT} – на 9,6%.

Отметим, что значения M_{em} и M_{emT} достаточно близки, хотя есть и очевидные отличия. При этом значения ЭММ M_{emT} можно считать более достоверными, так как формула (26) интегрально учитывает всю структуру магнитного поля на активной части ДПТ. А вот значения M_{em} определены через магнитный поток Φ_a, берущийся на поверхности сердечника якоря, а его взаимодействие с токами якоря происходит на высоте всего зубцово-пазового слоя якоря. Поэтому надо, в принципе, определять некоторый интегрально усредненный магнитный поток по толщине этого слоя.

Кроме электромагнитных параметров, представленных в табл. 2, интерес представляет координатное распределение МИ в зазоре и прилегающих частях сердечников ДПТ. Ведь именно «перекос» в распределении МИ в зазоре под действием реакции якоря считается в теории МПТ угрожающим увеличением межламельного напряжения на коллекторе [1-3].

Сразу отметим, что все последующие распределения МИ даются по линиям окружности конкретного радиуса на двух полюсных делениях и в зависимости от угловой координаты α (τ_p – полюсное деление), и, главным образом, для радиальной составляющей МИ B_r, которая, как считается, является основой электромагнитных процессов в якоре.

На рис. 6 представлены распределения МИ для базового варианта ДПТ. График 1 – распределение модуля МИ на линии посередине наконечника главного полюса. Эта кривая проявляет уровень насыщения стали в пределах дуги наконечника, а также ожидаемый очевидный перекос распределения МИ.

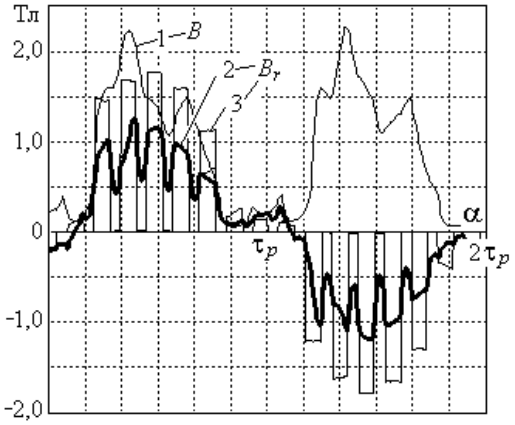


Рис. 6 – Распределения МИ для базовой конструкции ДПТ:
1 – модуль МИ *B* на радиальном уровне наконечника СГП;
2 – составляющая МИ B_r на среднем уровне зазора;
3 – B_r на среднем уровне зубцово-пазового слоя якоря

В зазоре и в зубцово-пазовом слое перекос (различие под разными краями наконечника СГП) распределения B_r хотя и есть, но относительно небольшой. Особенно важно последнее распределение, так как, что отмечено выше, именно в зубцово-пазовом слое происходит возбуждение ЭДС в секциях обмотки якоря, которая формирует и распределение межламельного напряжения на коллекторе. Очевидно, что наибольшее значение МИ на кривых 2 и 3 находится под серединой СГП и оно соответствует режиму ХХ. Таким образом, угрожающих изменений в распределении МИ под действием реакции якоря не происходит.

То же самое можно отметить и по графикам функций $B_r(\alpha)$ в зазоре (рис. 7) и на среднем уровне зубцово-пазового слоя (рис. 8) для вариантов δ1 и δ5, соответствующих вариантам *ex*δ1 и *ex*δ5 из табл. 2 при отсутствии и при максимальном эксцентриситете. Но при этом магнитная индукция под краями наконечника СГП в первом случае существенно больше. Соответственно, как показывает табл. 2, при отсутствии эксцентриситета полезные величины Φ_a и M_{em} заметно больше по сравнению с вариантом максимального эксцентриситета.

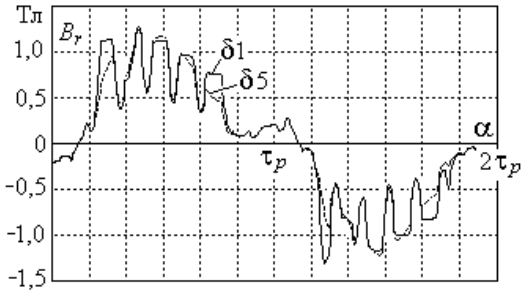


Рис. 7 – Распределение радиальной составляющей МИ
в зазоре при отсутствии и максимальном эксцентриситете

Обратное изменение частоты вращения естественно при неизменной входной мощности и практически одинаковой выходной мощности (различия в P_{out} происходят из-за изменения магнитных и механических потерь мощности).

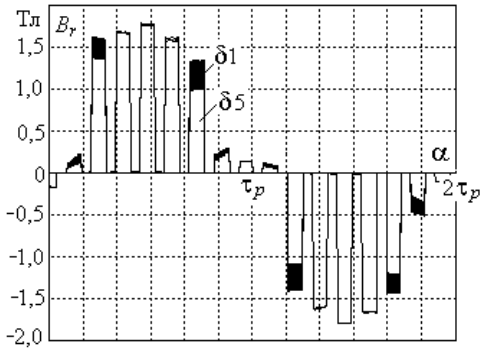


Рис. 8 – Распределение радиальной составляющей МИ
в зубцово-пазовом слое якоря при отсутствии и
максимальном эксцентриситете

Полученные результаты навели на мысль продолжить исследование ДПТ с равномерным зазором под СГП, но при его уменьшении. Результаты таких расчетов для трех значений зазора δ_g представлены в табл. 3, где вариант *ex*δ1 тот же, как и в табл. 2.

Соответствующие графики распределения МИ $B_r(\alpha)$ в зазоре (рис. 9) и на среднем уровне зубцово-пазового слоя (рис. 10) для крайних значениях зазора, соответствующих вариантам *ex*δ1 и *ex*δ1*b* из табл. 3 (кривые 1 и 2, соответственно).

Таблица 3 – Сравнение параметров ДПТ при разных значениях зазора под СГП, но без эксцентриситета

Вариант	δ_g, мм	δ_{gm}, мм	Φ_a, Вб	M_{em}, Н·м	n_r, об/мин	P_{out}, кВт	M_{emT}, Н·м
*ex*δ1	1,9	1,95	18,50	229,7	2594	59,73	227,6
*ex*δ1*a*	1,4	1,50	19,36	240,3	2479	59,80	238,4
*ex*δ1*b*	0,9	1,04	20,14	250,1	2382	59,85	245,6

Увеличение значений электромагнитных параметров Φ_a и M_{em} при уменьшении зазора естественно и очевидно: при уменьшении зазора δ_g под центром СГП на 52,6% произошло увеличение магнитного потока Φ_a на 8,86% и электромагнитного момента M_{em} на 8,88%. Изменения при этом частоты вращения n_r на 8,17% и выходной мощности на 0,37% происходит по причинам, которые уже были пояснены выше.

При полезном увеличении электромагнитных параметров критических изменений в распределении МИ не произошло. И хотя в зазоре есть под краем СГП некоторое превышение МИ над ее значением под серединой полюса (рис. 9), в зубцово-пазовом слое это нивелируется (рис. 10).

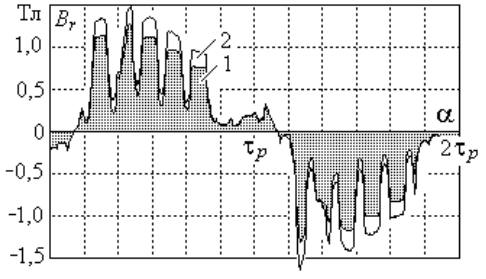


Рис. 9 – Распределение радиальной составляющей МИ
в зазоре для вариантов: 1 – *ex*δ1 и 2 – *ex*δ1b из табл. 3

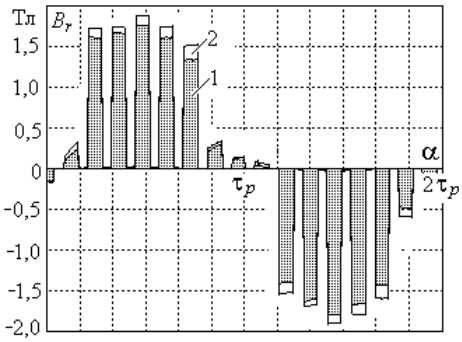


Рис. 10 – Распределение радиальной составляющей МИ в зубцово-пазовом слое для вариантов: 1 – *ex*δ1 и 2 – *ex*δ1b

Еще были рассмотрены выявленные тенденции в распределении МИ при разных значениях тока якорной цепи. Для сравнения с базовым значением I_a=197 А были взяты также уменьшенное и увеличенное вдвое значения этого тока. Результаты расчетов представлены в табл. 4 для вариантов максимального и минимального значений зазора δ_g при отсутствии эксцентриситета.

Таблица 4 – Сравнение параметров ДПТ при разных токах якоря и зазорах под СГП без эксцентриситета

Вариант	I_a, А	δ_g, мм	δ_{gm}, мм	Φ_a, Вб	M_{em}, Н·м	n_r, об/мин
*ex*δ1	98,5	1,9	1,95	13,52	83,9	3669
	197	1,9	1,95	18,50	229,7	2594
	394	1,9	1,95	22,26	542,2	2011
*ex*δ1b	98,5	0,9	1,04	16,50	101,6	3007
	197	0,9	1,04	20,14	250,1	2382
	394	0,9	1,04	23,07	558,8	1941

Это же было повторено при наличии эксцентриситета в базовом варианте и с максимальным эксцентриситетом при базовом значении зазора под центром СГП δ_g=1,9 мм (табл. 5). Иллюстрация распределения $B_r(\alpha)$ представлена на рис. 11 для базового варианта конструкции. Из табл. 5 и рис. 11 очевидно, что выявленные тенденции в изменениях электромагнитных параметров ДПТ и распределениях МИ под главными полюсами при изменении тока якорной цепи сохраняются.

Таблица 5 – Сравнение параметров ДПТ при разных токах и эксцентриситетах зазора под СГП при δ_g=1,9 мм

Вариант	I_a, А	δ_{gm}, мм	Φ_a, Вб	M_{em}, Н·м	n_r, об/мин	P_{out}, кВт	M_{emT}, Н·м
*ex*δ3	98,5	3,41	12,23	75,3	4056	28,64	75,9
	197	3,41	17,52	217,5	2739	59,60	215,1
	394	3,41	21,72	528,8	2061	114,10	539,4
*ex*δ5	98,5	4,45	11,41	70,2	4347	28,40	70,8
	197	4,45	16,85	209,2	2848	59,52	206,8
	394	4,45	21,34	519,6	2098	114,06	529,8

Исключение эксцентриситета и даже уменьшение зазора под главными полюсами приводит к повышению эффективности работы ДПТ, не создавая при этом угроз критического перераспределения МИ в его активной зоне под действием реакции якоря.

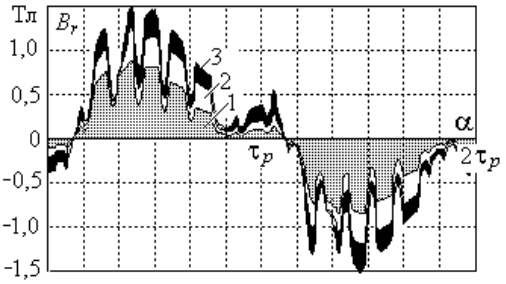


Рис. 11 –Распределение радиальной составляющей МИ в зазоре для базового варианта конструкции при разных значениях тока I_a: 1 – 98,5 А; 2 – 197 А; 3 – 394 А

Для машин с независимым и параллельным возбуждением надо провести отдельно аналогичные исследования, так как в них при изменении тока якорной цепи изменяющаяся реакция якоря действует на фоне неизменного магнитного поля обмотки возбуждения.

В завершение проведены расчеты для рассматриваемого ДПТ в условном режиме ХХ, когда ток был задан только в обмотке возбуждения. При этом рассмотрены варианты *ex*δ3 – базовой конструкции СГП, и *ex*δ1 – при отсутствии эксцентриситета. Эти же варианты рассматривались в табл. 2 и здесь повторены частично в табл. 6 вместе с результатами для режима ХХ. Очевидным является изменение магнитного потока при изменении эксцентриситета и при переходе от ХХ к номинальной нагрузке.

Таблица 6 – Сравнение параметров ДПТ при разном эксцентриситете зазора под СГП и в разных режимах

Режим	Вариант	r_{p1}, мм	δ_{gm}, мм	Φ_a, Вб
Холостой ход	*ex*δ1	103,4	1,95	18,50
	*ex*δ3	122,0	3,41	17,52
Номинальная нагрузка	*ex*δ1	103,4	1,95	19,17
	*ex*δ3	122,0	3,41	18,34

Картина магнитного поля в режиме ХХ для базовой конструкции ДПТ в целом дана на рис. 12 и в виде фрагмента на рис. 13, что аналогично рис. 3 и рис. 5.

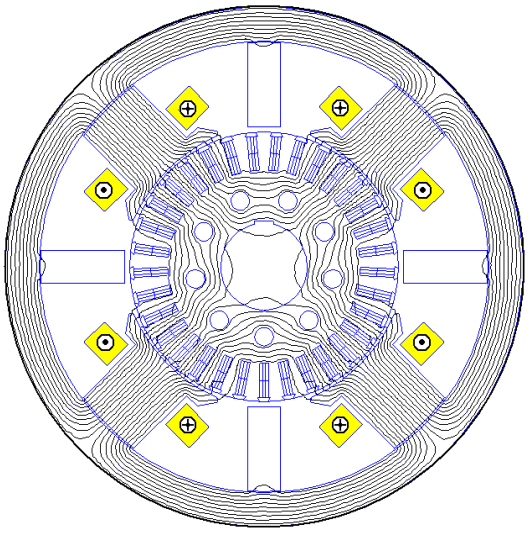


Рис. 12 – Полная картина магнитного поля для базовой конструкции ДПТ в режиме ХХ

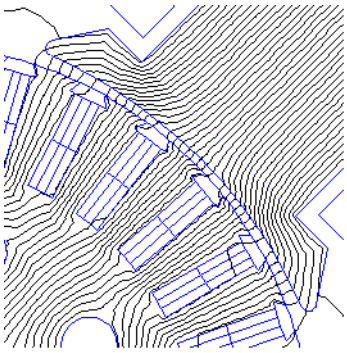


Рис. 13 – Фрагмент картины магнитного поля для базовой конструкции ДПТ в режиме ХХ

Распределение магнитной индукции в активной зоне под СГП для режима ХХ изображено на рис. 14 для двух вариантов конструкции, представленных в табл. 6. Эти распределения являются аналогами того, что показано на рис. 6 для режима номинальной нагрузки ДПТ.

Сравнение взаимосоответствующих результатов показывает, какие изменения происходят в ДПТ при переходе от режима ХХ к номинальной нагрузке.

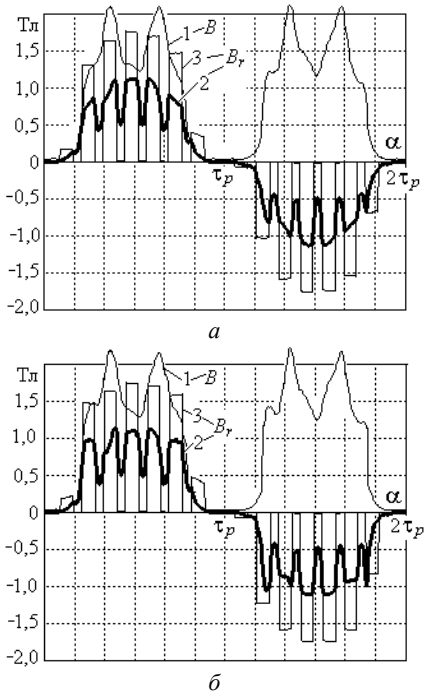


Рис. 14 – Распределения МИ в режиме ХХ:
а – для базовой конструкции ДПТ;
б – для модели при отсутствии эксцентриситета:
1 – модуль МИ *B* на радиальном уровне наконечника СГП;
2 – составляющая МИ B_r на среднем уровне зазора;
3 – B_r на среднем уровне зубцово-пазового слоя якоря

Выводы.

1. Численно-полевой анализ электромагнитных параметров и распределений магнитной индукции при изменении эксцентриситета зазора под главными полюсами и самого зазора позволил выявить аспекты, которые ранее были недоступны при использовании расчета магнитного поля в МПТ классическим методом магнитной цепи.

2. Исключение эксцентриситета зазора и даже уменьшение величины зазора, по сравнению с базовой конструкцией рассмотренного ДПТ, спроектированного на основе классических методов, не приводит к таким изменениям распределения магнитной индукции в активной зоне машины, которые приводили бы к ее повышению под краями наконечника СГП под действием реакции якоря. Таким образом, угрозы увеличения локального максимума межламельного напряжения на коллекторе не наблюдается.

3. За счет изменений величины зазора под сердечниками главных полюсов и его эксцентриситета можно увеличить магнитный поток и электромагнитный момент ДПТ на несколько процентов, что в конечном итоге приведет к соответствующим увеличениям полезной мощности и КПД машины. Это особенно важно при современных требованиях к энергоэффективности электрических машин в условиях жесткой конкуренции на их рынке.

4. Для принятия конкретных решений по уточнению конструктивных решений относительно СГП и размера зазора следует продолжить исследования на основе численно-полевого подхода с целью непосредственного определения межламельного напряжения на коллекторе, а также дополнительных потерь мощности в наконечнике этого сердечника.

5. Результаты исследований показали, что благодаря использованию численно-полевых расчетов при проектировании МПТ, возможно уточнение в части их электромагнитных параметров.

Список литературы

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А. И. Вольдек, В. В. Попов.– СПб. : Питер, 2008. – 320 с.
2. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори: навчальний посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А.Н., 2017. – 482 с.
3. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др. Под ред. И. П. Копылова. – М. : Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.
4. Bianchi Nicola. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material) / Nicola Bianchi // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. – 276 p.
5. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. – Режим доступа: http://www.femm.info/wiki/OldVersions. − Дата обращения : 10 марта 2014 г.
6. Милых В. И. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Електротехніка і електромеханіка. –2006. – №2. – С. 40-46.
7. Милых В.И. Расчетно-экспериментальное тестирование программы FEMM и преодоление проблем её использования для расчета магнитного поля электрических машин / В.И. Милых, И.В. Поляков, Н.В. Полякова, Е.И. Штангеев // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №3. – С. 38-43.
8. Милых В. И. Автоматизированное формирование расчетных моделей турбогенераторов для программной среды FEMM / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №4. – С. 7-14.
9. Милых В.И. Автоматизированное формирование расчетных моделей трехфазных асинхронных двигателей для программной среды FEMM / В. И. Милых // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2017. – № 1(1123). – С. 3-15.
10. Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин / В. И. Милых // Электротехника. – 1982. – №12. – С.46-49.

References (transliterated)

1. Voldek A. I., Popov V. V. *Elektricheskie mashinyi. Vvedeniye v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* [Electrical Machines. Introduction to electromechanics. DC machines and transformers], SPb, Piter Publ, 2008, 320 p. (Rus)
2. Ostashevskyy M.O., Yuryeva O.Yu. *Elektrychni mashyny i transformatory* [Electric Machines and Transformers]: Textbook / ed. V.I. Milykh. Kharkiv: FOP Panov A.N, 2017, 482 p. (Ukr)
3. Kopyilov I. P., Goryainov F. A., Klokov B. K. *Proektirovanie elektricheskih mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Yurait Publ, 2011, 767 p. (Rus)
4. Bianchi, Nicola. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material)*. CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005, 276 p.
5. Meeker, D. "Finite Element Method Magnetics: OldVersions." *Finite Element Method Magnetics: HomePage.* DavidMeeker, 11 October 2010. Web. 10 March 2014 <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>
6. Milykh V. I., Polyakova N. V. Opredelenie elektromagnitnyih parametrov elektricheskih mashin na osnove chislennyih raschetov magnitnyih poley [Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field]. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*. 2006, no.2, pp. 40-46. (Rus)
7. Milykh V.I., Polyakov I.V., Polyakova N.V., Shtangeev Ye.I. Raschetno-eksperimental'noye testirovaniye programmy FEMM i preodoleniye problem yeyo ispol'zovaniya dlya rascheta magnitnogo polya elektricheskikh mashin [Analytical-Experimental Testing of FEMM Program and Overcoming of Problems of its Application to Electrical Machine Magnetic Field Computations]. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*. 2004, no.3, pp. 38-43. (Rus)
8. Milykh V.I., Polyakova N.V. Avtomatizirovannoe formirovanie raschetnyih modeley turbogeneratorov dlya programmnoy sredyi FEMM [Automated formation of calculation models of turbogenerator for software environment FEMM]. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*. 2015, no. 4, pp. 7-14. (Rus)
9. Milykh V.I. Avtomatizirovannoe formirovanie raschetnyih modeley trehfaznyih asinhronnyih dvigateley dlya programmnoy sredyi FEMM [Automated formation of calculation models of a three-phase induction motors for software environment FEMM] // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion". 2017, no 1(1123). pp. 3–15. (Rus)
10. Milykh V.I. Raschet elektromagnitnogo polya v poperechnom sechenii elektricheskikh mashin [Calculation of the electromagnetic field in the cross section of electrical machines] *Electrotekhnika – Electrical engineering*. 1982, no. 12, pp. 46-49.

Поступила (received) 06.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельно-польовий аналіз ефективності ексцентриситету проміжку під головними полюсами в двигуні постійного струму з послідовним збудженням / В. І. Мілих, С. Є. Дзеніс // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 04–13. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Численно-полевой анализ эффективности эксцентриситета зазора под главными полюсами в двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением / В. И. Милых, С. Е. Дзенис // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 04–13. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

A numerical-field analysis of the eccentricity efficiency of the gap under the main poles in a DC motor with series excitation / V. I. Milykh, S. E. Dzenis // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 04–13. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мілих Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних машин, тел. (057)707-65-14;
e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Милых Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой электрических машин,
тел. (057)707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Milykh Vladimir Ivanovych, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Chair of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14;
e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Дзеніс Сергій Євгенович, ПАТ «Електромашина» (Харків), начальник Спеціального конструкторського бюро, тел. 0506328429, e-mail: sergii.dzenis@gmail.com.

Дзенис Сергей Евгеньевич, ПАО «Электромашина» (Харьков), начальник Специального конструкторского бюро, тел. 0506328429, e-mail: sergii.dzenis@gmail.com.

Dzenis Sergey Evgenievich, PJSC Electromashina (Kharkov), Head of the Special Design Bureau, tel. 0506328429, e-mail: sergii.dzenis@gmail.com**.**

УДК 621.313

В. Ф. ШИНКАРЕНКО, И. А. ШВЕДЧИКОВА, В. В. КОТЛЯРОВА

ИЗОТОПИЯ В СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ И ЭВОЛЮЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Аналізується еволюція вчення про ізотопію за останні 100 років. Розглянуто принципи структуроутворення електромагнітних джерел-ізотопів і визначено ієрархію рівнів їх складності в структурній організації електромеханічних перетворювачів енергії. Показано взаємозв'язок структурної ізотопії з елементно-інформаційним базисом породжувальної системи і технічною еволюцією видів-близнюків електромеханічних систем. Визначено генетичні програми і основні властивості структур – ізотопів перших чотирьох поколінь. Наведено результати постановки еволюційних експериментів, що підтверджують достовірність генетичних програм в структуроутворенні об'єктів – близнюків. Показана міждисциплінарність явища ізотопії в системах як природного, так і антропогенного походження. Наведено приклади практичного використання результатів досліджень в задачах інноваційного синтезу нових різновидів електромеханічних об'єктів.

Ключові слова: електромеханіка, структурна ізотопія, генетична програма, еволюція, експеримент, системність.

Анализируется эволюция учения об изотопии за последние 100 лет. Рассмотрены принципы структурообразования электромагнитных источников-изотопов и определена иерархия уровней их сложности в структурной организации электромеханических преобразователей энергии. Показана взаимосвязь структурной изотопии с элементно-информационным базисом порождающей системы и технической эволюцией видов-близнецов электромеханических систем. Приведены результаты постановки эволюционных экспериментов, подтверждающие достоверность генетических программ в структурообразовании объектов-близнецов. Показана междисциплинарность явления изотопии в системах как естественного, так и антропогенного происхождения. Приведены примеры практического использования результатов исследований в задачах инновационного синтеза новых разновидностей электромеханических объектов.

Ключевые слова: электромеханика, структурная изотопия, генетическая программа, эволюция, эксперимент, системность.

Purpose. Scientific explanation of the system nature and principles of isotope formation in technical systems using the example of analysis of genetic programs and the technical evolution of electromechanical energy converters. **Methodology.** Research of the principles of isotope sources structure formation was carried out in accordance with the principles of conservation of symmetry and topological invariance, homology and the principle of pairing, the principle of conservation of genetic information and integral periodicity, the form of representation of which is the structure of genetic classification. The reliability of the structural isotopy theory and the degree of its manifestation in the technical evolution of electromagnetic objects was verified by evolutionary experiments. **Results.** The main results of the study of isotopy in the last 100 years are considered. The principles of structure formation of electromagnetic isotopes sources and the hierarchy of complexity levels in the structural organization of the electromechanical energy converters are determined. The relationship of isotope structures with element information basis of the generative system and the twin-species determining the direction of the technical evolution of electromechanical systems is shown. The results of evolutionary experiments setting confirming the accuracy of the structural prediction using genetic structure formation programs of isotopes are presented. Systemability of isotopy phenomena in a genetically-organized systems both natural and anthropogenic origin is analyzed. **Originality.** The system nature of isotopy is presented based on its direct connection with the element and information basis of genetically organized systems, with the structure of groups and the periods of the generating system of primary elements. The systemic nature of isotopy makes it necessary to extend it to other evolving technical systems. **Practical value.** The practical significance of research results is determined by the development of genetic data banks that systematize information on the genetically permissible variety of isotope sources. Such information systems supplemented by information on existing types of twin objects form the information basis for the realization of the technology of structural prediction and the implementation of directed synthesis of new electromechanical objects.

Keywords: electromechanics structural isotopy, genetic program, evolution, experiment, systemability.

Введение. Исследование принципов структурной организации сложных развивающихся систем сегодня считается одной из самых востребованных форм научного знания. С точки зрения структурно-системного подхода окружающий мир рассматривается современной наукой как сложная система, состоящая из множества иерархически организованных и развивающихся подсистем различной физической природы (космических, химических, биологических, социальных, технических и др.), находящихся в разного рода отношениях и связях друг с другом и образующих определенную целостность. «Мир представляется как открытая динамичная система, в которой «все взаимодействует со всем, все проявляется во всем», и самоорганизацией, которой управляют фундаментальные законы природы: закон равновесия, как определяющий условие устойчивости, и законы сохранения…» [1].

Результаты структурно-системных исследований, полученные в последнее время в области структурной и генетической электромеханики, позволили выделить особый класс генетически организованных систем (ГОС), к категории которых относятся и системы, функционирующие на электромеханических принципах преобразования энергии. Генетически организованная система – целостная система физической или абстрактной природы, функционирование и структурная эволюция которой осуществляется на основе системных законов информационной наследственности и структурной изменчивости, обеспечивающих ее развитие и равновесие с окружающей средой.

Отличительным свойством ГОС является наличие собственного элементно-информационного базиса, системным носителем которого выступает периодическая порождающая система (Generative System) первичных элементов. Для структур электромагнитного типа эту функцию выполняет генетическая классификация (ГК) первичных источников электромагнитного поля, которая одновременно является формой представления принципов сохранения электромагнитных структур (ЭМ-структур) и интегрального периодического закона [2].

Высокая степень структурно-информационной упорядоченности порождающего элементного базиса

© В.Ф. Шинкаренко, И.А. Шведчикова, В.В. Котлярова, 2018

ГК с учетом горизонтального обмена информацией между ГОС различной генетической природы открывает возможность выявления и анализа инвариантных свойств исследуемых классов структур в их логической взаимосвязи с принципами и законами, которые классической наукой рассматриваются как частные принципы, присущие только определенному типу физической системы. К категории таких фундаментальных свойств относится явление изотопии, которое до недавнего времени считалось специфическим свойством лишь отдельных химических элементов, а сегодня является объектом исследования многих научных дисциплин (физики элементарных частиц, биофизики, алгебраической топологии, лингвистики и др.).

Поэтому важной задачей генетической электромеханики, как и других технических дисциплин, является изучение природы и принципов структурообразования изотопов и определение их места и значения в эволюции электромеханических преобразователей энергии.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Формирование системных представлений в науке является длительным и нелинейным процессом реализации индуктивного метода познания «от частного к общему». Структурно-системный подход позволяет интегрировать целостную картину мира на основе конвергенции различных областей знаний и горизонтального (междисциплинарного) обмена информацией. В том случае, когда объектом исследования становится одно из свойств, определяющих понятие целостности ГОС, тогда то, что длительное время считалось специфичным, для узкой области знаний, со временем приобретает статус системного фундаментального принципа или закона. Не исключением стало и явление изотопии, достаточно сложный процесс познания которого длится уже более чем 100 лет.

Как известно, термин «изотопия» происходит от греческих слов: *ισοξ* – одинаковый, *τοποξ* – место. Длительное время явление изотопии считалась специфическим свойством, присущим отдельным химическим элементам. Изотопию химических элементов впервые предвидел У. Крукс, который в 1887–1889 гг. выдвинул гипотезу существования метаэлементов (атомных разновидностей химических элементов). Атомы, которые имеют различный вес, но занимают одно и то же место в периодической системе химических элементов, в 1910 г. Ф. Содди назвал изотопами [3]. Диапазон распространения и практического применения химических изотопов сегодня исключительно широк и разнообразен. Уникальные свойства и растущая значимость практического применения изотопов, которые заняли доминирующее положение в их исследовании, отодвинули изучение системной природы этого явления на второй план. В настоящее время уже открыто и синтезировано более чем 3000 изотопов 114 химических элементов, подтверждённых Международным союзом теоретической и прикладной химии (IUPAC) [4]. Согласно прогнозам специалистов более 4000 изотопов еще предстоит открыть. Однако попытки ряда ученых построить периодическую систему изотопов на основе естественной системы химических элементов пока не увенчались успехом [5].

Более поздними исследованиями было установлено, что в химических и биохимических реакциях наряду с классическим, масс-зависящим изотопным эффектом, сортирующим ядра по массам, имеет место также магнитный изотопный эффект, который фракционирует ядра по их магнитным моментам. Магнитный изотопный эффект сохраняет память о космохимическом, геохимическом и биохимическом происхождении молекул вещества. С 1972 г. исследование изотопических эффектов магнитного типа выделилось в самостоятельное научное направление, обобщаемое понятием магнитной изотопии [6].

Одним из крупнейших научных достижений прошлого столетия стало открытие и изучение генетического единства и изотопной гетерогенности вещества Солнечной системы. При исследовании химического состава метеоритного вещества впервые было установлена наследственная взаимосвязь между первичными (короткоживущими) изотопами и их изотопическими «потомками», сохраняющими память о некогда существовавших изотопах-предшественниках, родившихся при взрыве сверхновых звезд [7].

Распространению исследований изотопических явлений в других дисциплинах способствовало введение понятия изотопии в топологии (Analysis Situs), которое первоначально использовалось для описания различий в гомеоморфизме комплексов [8]. В современной трактовке к преобразованиям изотопии относятся произвольные топологически эквивалентные преобразования, которые допускают непрерывную деформацию одного подмногообразия в другое без самопересечений [9].

В 60-х гг. прошлого столетия А.-Ж. Греймас перенес понятие изотопии с химии и физики в лингвистику, где под этим термином обобщались варианты семантической эквивалентности, т.е. рекуррентной повторяемости семантических элементов, принадлежащих к одной и той же категории [10]. Несколько позже последователями Греймаса было также введено понятие родовой и видовой семантической изотопии. На данное время семантическая изотопия представлена рядом научных направлений в лингвистических и литературоведческих исследованиях.

В 1932 г. в физике элементарных частиц В. Гейзенберг высказал идею о том, что протон и нейтрон необходимо рассматривать как два возможных состояния одной и той же частицы – нуклона [11]. Для описания указанных состояний были введены понятия изотопической симметрии, изотопического спина и изотопической инвариантности. Последующий анализ изотопических различий сыграл определяющую роль в разработке систематики элементарных частиц, за которую американский физик М. Гелл-Манн получил Нобелевскую премию по физике за 1969 г. [12].

Современный уровень представлений об изотопии существенно расширился. Исследования показы-

вают, что изотопы являются носителями памяти о рождении и преобразовании молекул, а фракционирование изотопов определяет не только химическую, но и биологическую историю вещества. Молекула хранит память о своем рождении, которая может быть как короткой – длительностью в тысячные и миллиардные доли секунды после рождения, так и длинной – длительностью в тысячелетия [13]. Исходная идея, определяющая интерес к исследованию роли изотопии для биологических форм жизни, была впервые высказана В.И. Вернадским. В работе, опубликованной в 1926 г. под названием «Изотопы и живое вещество», В.И. Вернадский предположил, что «живые организмы способны избирать определенные изотопы из их смесей, каковыми являются многие элементы окружающей нас среды» [14].

Фракционирование изотопов в живых организмах обладает принципиальным и глубоким своеобразием, обусловленным ферментативным характером процессов биосинтеза. В начале нынешнего столетия было опубликовано ряд работ, посвященных изотопии молекул ДНК**,** в которых развивается концепция вероятной роли этого явления в молекулярной эволюции живых систем. Результаты исследований и проведенные эксперименты, подтвердили наличие изотопного эффекта в конформациях молекул ДНК [15].

Открытием порождающей системы первичных источников электромагнитного поля было положено начало структурно-системным исследованиям в развивающихся технических системах. В 1998 г. при изучении инвариантных свойств первичных источников электромагнитного поля в периодической структуре ГК были обнаружены разновидности первичных элементов, генетический код которых полностью совпадал с генетическим кодом источников поля базового уровня, но отличались от последних своей локальной пространственной геометрией при условии сохранения их родовой геометрии. Общность составляющих генетической информации в структуре генетических кодов и одинаковость местоположения новых элементов в периодической структуре ГК дало основание обобщить разнообразие таких первичных структур понятием первичных источников-изотопов [2, 16]. В структуре универсального генетического кода источник-изотоп обозначается верхним цифровым индексом перед буквенной составляющей кода, который соответствует порядковому номеру источника-изотопа в ряду поколений (например, $^{1}CL2.0x$; $^{3}TP0.2y$).

Краткий анализ истории учения об изотопии наглядно показывает сложность и неоднозначность процесса познания одного из фундаментальных принципов структурной организации сложных систем. За 100 лет эволюции границы учения об изотопии существенно расширились и обогатились впечатляющими результатами в части широкого практического использования химических изотопов в различных областях человеческой деятельности. Однако исследования изотопии, особенно в системах антропогенного типа, еще далеки от завершения, что не дает однозначного ответа об универсальности и междисциплинарности этого явления, ограничиваясь результатами их анализа, не выходящими за пределы понятия «системы в системе».

Цель и задачи исследования. Структурный потенциал первичных источников-изотопов в значительной мере остается невостребованным и скрытым от исследователей из-за отсутствия системных исследований по структурной изотопии в технических науках, огромного разнообразия возможных форм и сложной пространственной геометрии активных поверхностей. Поэтому целью работы является научное объяснение системной природы и принципов структурообразования изотопов в технических системах на примере анализа генетических программ и технической эволюции электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ).

Для достижения указанной цели были поставлены следующие основные задачи:

- определить принципы структурообразования источников-изотопов и исследовать их взаимосвязь с элементно-информационным базисом периодической структуры ГК;
- исследовать системные и индивидуальные свойства источников-изотопов и установить их непосредственную связь с технической эволюцией объектов электромеханики;
- определить генетические программы и разработать систематизированные генетические каталоги источников-изотопов;
- провести эволюционные эксперименты, необходимые для подтверждения достоверности теоретических положений и моделей структурообразования электромагнитных изотопов;
- осуществить междисциплинарный анализ системности изотопии в генетически организованных системах различной физической природы.

Принципы структурообразования источников-изотопов. Общность принципа кодирования генетической информации и генетическое родство с источниками базового уровня ГК указывает на то, что на источники-изотопы распространяются общесистемные принципы структурообразования: принципы сохранения симметрии и топологической инвариантности, гомология и принцип парности, принцип сохранения генетической информации и интегральная периодичность, формой представления которых является структура ГК (табл. 1). Процесс структурообразования произвольного объекта-потомка на основе источника-изотопа можно представить генетической моделью: «генетический код источника-изотопа» → «электромеханический объект-близнец» → «популяция объектов-близнецов» → «вид-близнец» → «род-близнец». Указанная иерархическая последовательность уровней сложности свидетельствует о генетической природе структурной изотопии ЭМПЭ.

Таблица 1 – Взаимосвязь уровней структурной организации электромагнитных объектов с элементно-информационным базисом порождающей системы

Структурная единица порождающей системы	Принципы	Инвариантная составляющая генетической информации	Таксономическая категория
Элемент (первичный источник поля)	Принципы сохранения электромагнитной симметрии; топологической инвариантности; генетической информации	Код источника поля	Базовый вид
		Цифровой индекс изотопа	Виды-близнецы
	Принцип парности	Третья составляющая кода	Виды-двойники
Малый период	Принцип диссимметризации П. Кюри	Первая составляющая кода	Род
Подгруппа	Принцип топологической инвариантности	Вторая и третья составляющие кода	Гомологический ряд видов

Наличие детерминированной информационной связи между генетическими кодами изотопов и разнообразием видов-близнецов, по существу, подтверждает известный вывод, сделанный шведским естествоиспытателем Карлом Линнеем еще в 1751 г.: «Видов насчитываем столько, сколько различных форм создано в самом начале» [17], но с одним важным уточнением: функцию «начала» процессов видообразования в данном случае выполняет элементно-информационный базис ГК. Отсюда следует, что строгое разделение элементного базиса на структуры базового уровня и структуры-изотопы возможно только на уровне периодических порождающих систем первичных элементов, которые выступают системным носителем их генетических кодов.

Как известно, наиболее общими являются свойства структур, инвариантные при любых топологических преобразованиях. В периодической структуре ГК основные характеристики топологических пространств (непрерывность, связность, ориентируемость) определяют свойства первичных источников поля в пределах подгрупп. Поэтому топологические инварианты входят в состав универсальных генетических кодов, т.е. определяют фундаментальные принципы структурообразования сложных ЭМ-систем, организованных по генетическим принципам.

Одним из важнейших понятий топологии является понятие объемлющей изотопии, которое непосредственно связано с непрерывной деформацией многообразия «объемлющего пространства», переводящее одно подмногообразие в другое [18]. В структуре малых периодов ГК свойством «объемлющего пространства» наделена родовая геометрия источников поля.

Рассмотрим пример формообразования ряда генетически родственных структур на примере первичного источника поля $X_{CL0.2y}$ с цилиндрической активной поверхностью. Процедуру генерации топологически эквивалентных электромагнитных структур, при условии сохранения объемлющей геометрии Рода (G_{CL} = *const*) и неизменности топологии источника (*0.2y = const*), можно представить следующей последовательностью гомеоморфных преобразований [18]:

$$f_1 : X_{CL\ 0.2y} \rightarrow Y_1 = X^{1}{}_{CL\ 0.2y}, \quad (1)$$

$$f_2 : X^{1}{}_{CL\ 0.2y} \rightarrow Y_2 = X^{2}{}_{CL\ 0.2y}, \quad (2)$$

$$f_3 : X^{2}{}_{CL\ 0.2y} \rightarrow Y_3 = X^{3}{}_{CL\ 0.2y}, \quad (3)$$

$$\dots$$

$$f_n : X^{n-1}{}_{CL\ 0.2y} \rightarrow Y_n = X^{n}{}_{CL\ 0.2y}, \quad (4)$$

где f_1, f_2, f_3 – функции гомеоморфных преобразований (непрерывных деформаций);

$Y_1 = X^{1}{}_{CL0.2y}$, $Y_2 = X^{2}{}_{CL\ 0.2y}$, $Y_3 = X^{3}{}_{CL\ 0.2y}$, …., $Y_n = X^{n}{}_{CL\ 0.2y}$ – источники-изотопы 1-*n* поколений.

Последовательности преобразований (1-4) с учетом составляющих генетической информации ставится в соответствие ряд пространственных структур источников-изотопов (рис. 1).

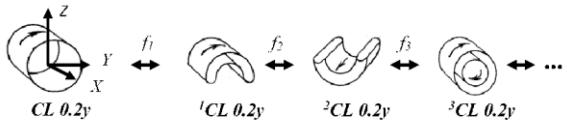


Рис. 1 – Гомеоморфизм источников-изотопов (фрагмент ряда): *CL0.2y* – исходная (объемлющая) активная поверхность первичного источника поля базового уровня; $^{1}CL0.2y$, $^{2}CL0.2y$, $^{3}CL0.2y$ – поверхности источников-изотопов 1-3 поколений; f_1, f_2, f_3 – функции гомеоморфных преобразований

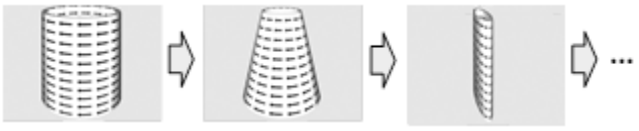
Идентичность генетических кодов свидетельствует о том, что синтезированный ряд источников электромагнитного поля принадлежит к общему топологическому пространству, а вариации геометрии их активных поверхностей представляют собой результат локального полиморфизма для заданного объемлющего пространства (в данном случае пространства с симметрией цилиндра). Гомеоморфизм источников-изотопов одновременно определяет и метод их синтеза, который приобретает статус формализованного и направленного путем применения группы пространственных деформаций.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что гомеоморфизм первичных источников в структуре ГК проявляется не только на локальном (элементном) уровне (рис. 1), но и на групповом уровне (в пределах соответствующих подгрупп). В соответствии с принципом топологической инвариантности первичные источники поля в пределах евк-

лидового пространства R^3 произвольной подгруппы G_i первого большого периода ГК связаны между собой гомеоморфными преобразованиями:

$$f_1 : X_{CL\,0.2y} \rightarrow Y_1 = X_{KN\,0.2y}, \quad (5)$$
$$f_2 : X_{KN\,0.2y} \rightarrow Y_2 = X_{PL\,0.2y}, \quad (6)$$
$$f_3 : X_{PL\,0.2y} \rightarrow Y_3 = X_{TP\,0.2y}, \quad (7)$$
$$f_4 : X_{TP\,0.2y} \rightarrow Y_4 = X_{SF\,0.2y}, \quad (8)$$
$$f_5 : X_{SF\,0.2y} \rightarrow Y_5 = X_{TC\,0.2y}. \quad (9)$$

Топологическое родство порождающих структур на групповом и элементном уровнях имеет принципиальное различие. Если гомеоморфизм произвольного элемента порождающей системы отображает свойство его геометрического полиморфизма и представляет метод синтеза структур-изотопов, то групповой гомеоморфизм порождает гомологические ряды первичных источников и определяет методы синтеза ЭМ-структур на основе закона гомологических рядов (рис. 2).



а *б*

в

Рис .2 – Групповой гомеоморфизм источников магнитного поля (подгруппа 0.2*y*): *а* – цилиндрическая ($S_{CL0.2y}$); *б* – коническая ($S_{KN0.2y}$); *в* – плоская ($S_{PL\,0.2y}$) активные поверхности

В структурной эволюции электромеханических объектов (ЭМ-объектов) источники-изотопы выполняют функцию порождающих структур по отношению к большому разнообразию неявных (еще отсутствующих на данное время эволюции) Видов, образуя параллелизмы близнецовых структур на всех иерархических уровнях структурной организации ЭМПЭ. Разнообразие источников-изотопов электромагнитного типа отображает общесистемное свойство полиморфизма, присущее материальному миру, эволюционирующему на принципах информационной наследственности. В концепции общей теории систем принцип полиморфизма имеет статус закона природы [19].

Свойства источников-изотопов. Отличия в свойствах источников-изотопов по отношению к источникам базового уровня обусловлены их электромагнитной природой и многовариантностью возможных структурных реализаций, удовлетворяющих первой составляющей генетической информации в структуре универсального генетического кода. В качестве примера рассмотрим свойства базового источника поля *CL 0.2y* и двух ближайших источников-изотопов ^{1}*CL 0.2y* и ^{2}*CL 0.2y* (табл. 2).

Источники изотопных уровней сохраняют свойства базовых источников в части родовой геометрии (первая составляющая генетического кода), а также свойства, определяемые второй и третьей составляющей генетического кода: группу электромагнитной симметрии (0.2); число Бетти (β_{CL02}=1); ориентированность источника (*y*–типа); топологический класс поверхности (двухсторонние, замкнутые с краями); тип краевых электромагнитных эффектов (первичный, поперечный).

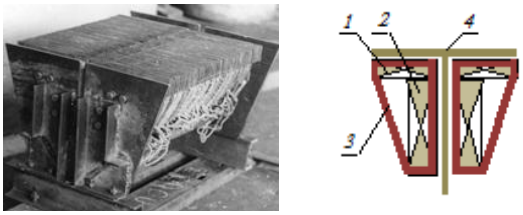
Таблица 2 – Отличительные свойства источников-изотопов ^{1}*CL 0.2y* и ^{2}*CL 0.2y*

Свойства	Первичный источник поля базового уровня	Источник-изотоп (поколение 1)	Источник-изотоп (поколение 2)
Генетический код	*CL 0.2y*	^{1}*CL 0.2y*	^{2}*CL 0.2y*
Графическое изображение			
Группа симметрии	$n = \infty$; m= 1	n = 2; m= 1	n = 2; m/m = 1/1
Обобщенные параметры активной поверхности	R, L	R_1, R_2,α, L	R_1, R_2,α, L
Число активных сторон	1	2	2
Пространственная геометрия	Цилиндрическая замкнутая	Цилиндрическая замкнутая, дуговая	Цилиндрическая замкнутая, дуговая
Волна поля	Вращающаяся, ω	Вращающаяся, ω	Бегущая, V
Инверсия волны поля	–	+	+

Отличительной особенностью источников-изотопов и синтезированных на их основе ЭМ-объектов близнецового типа является более высокий уровень сложности пространственной геометрии их активной поверхности по сравнению с источниками базового уровня. В большинстве случаев указанная сложность компенсируется возможностью улучшения удельных показателей, повышения эффективности использования активных материалов обмотки-близнеца, увеличения числа активных сторон или получения инверсных магнитных полей на смежных активных поверхностях (рис. 3).

Устойчивость информационных связей в объектах-близнецах обеспечивается принципом сохранения генетической информации. Общность генетических кодов базовых источников и источников-изотопов позволяет осуществлять постановку задач типа «открытие систем», т.е. определять генетические программы структур-близнецов по информации единичного объекта. Параллелизм свойств источников базового уровня и изотопов указывает на то, что произвольный объект-близнец будет обладать эффектом «генетической памяти», т.к. он является носителем генетической информации о своей порождающей

структуре, ее местоположении в структуре ГК и принадлежности к определенному роду и гомологическому ряду. В генетической электромеханике феномен генетической памяти ЭМ-объектов положен в основу методологии генетического анализа, используемого при определении и расшифровке генетических программ функциональных классов ЭМ-систем по информации единичного представителя класса [20].



а *б*

Рис. 3 – Двухсторонний плоский индуктор тягового линейного двигателя (ОКБ ЛЭД) – представитель вида-близнеца 2(^{1}PL2.0*x*) с Г-образной активной поверхностью:
а – общий вид индуктора; *б* – поперечный разрез двигателя: *1* – магнитопровод; *2* – секция кольцевой распределенной обмотки; *3* – секция обмотки с Г-образной активной зоной; *4* – Т-образный вторичный элемент

Разнообразие источников-изотопов определяется и упорядочивается структурой порождающей периодической системы, образуя, по отношению к первичным элементам базового уровня, иерархическую последовательность параллельных уровней (поколений) источников-изотопов. Изотопы различных геометрических видов, относящихся к одному поколению (имеющих общий числовой индекс), образуют гомологические ряды структур-близнецов в пределах соответствующих подгрупп. Поэтому изотопный состав *i*-го поколения ($i\neq0$) в пределах первого большого периода ГК можно представить полным набором «идеальных» гомологических рядов

$$({}^iH_{00y}, {}^iH_{00x}, iH_{02y}, {}^iH_{20x}, {}^iH_{22y}, {}^iH_{22x}) \subset S_i, \quad (10)$$

где S_i – множество порождающих элементов-изотопов первого большого периода ГК;

$${}^iH_{00y}=({}^iC_{CL}; {}^iC_{KN}; {}^iC_{PL}; {}^iC_{TP}; {}^iC_{SF}; {}^iC_{TC})_{00y}, \quad (11)$$
$${}^iH_{00x}=({}^iC_{CL}; {}^iC_{KN}; {}^iC_{PL}; {}^iC_{TP}; {}^iC_{SF}; {}^iC_{TC})_{00x}, \quad (12)$$
$${}^iH_{02y}=({}^iC_{CL}; {}^iC_{KN}; {}^iC_{PL}; {}^iC_{TP}; {}^iC_{SF}; {}^iC_{TC})_{02y}, \quad (13)$$
$${}^iH_{20x}=({}^iC_{CL}; {}^iC_{KN}; {}^iC_{PL}; {}^iC_{TP}; {}^iC_{SF}; {}^iC_{TC})_{20x}, \quad (14)$$
$${}^iH_{22y}=({}^iC_{CL}; {}^iC_{KN}; {}^iC_{PL}; {}^iC_{TP}; {}^iC_{SF}; {}^iC_{TC})_{22y}, \quad (15)$$
$${}^iH_{22x}=({}^iC_{CL}; {}^iC_{KN}; {}^iC_{PL}; {}^iC_{TP}; {}^iC_{SF}; {}^iC_{TC})_{22x}. \quad (16)$$

Подмножество порождающих структур, представленное рядами (10-16), выполняет функцию макрогенетической программы источников-изотопов *i*-го поколения (рис. 4).

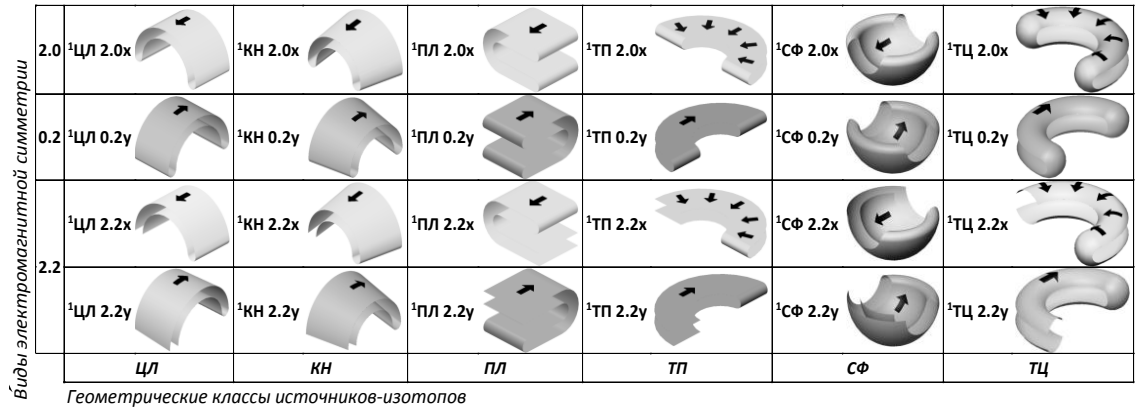


Рис. 4 – Генетическая программа источников-изотопов первого поколения в координатах базовых признаков ГК (первый большой период; группы 0.2, 2.0 и 2.2)

В пределах произвольного поколения N^i сохраняется как генетическая структура, так и системные свойства источников-изотопов. Это указывает на то, что независимо от уровня сложности такие свойства как гомология, парность, таксономические свойства и др. произвольного порождающего источника и структур-потомков будут определяться положением источника в периодической структуре ГК.

Исходя из непрерывности топологических пространств мощность множества источников-изотопов при числе поколений $N\geq2$ всегда будет выше мощности множества источников поля базового уровня. Например, для первых 5-ти поколений исходного множества первичных источников поля первого большого периода ГК ($N^1 = 36$) мощность множества источников изотопов будет равна ${}^iN = 180$ ($i = 1, \ldots, 5$). Наличие детерминированных высокоупорядоченных связей между первичными источниками поля базового уровня ГК и соответствующими поколениями источников-изотопов позволяет предвидеть их структурное разнообразие и определить системные свойства (генетическую информацию) структур-потомков.

Эволюционные эксперименты. В процессе технической эволюции структуры-близнецы присутствуют на всех уровнях структурной организации ЭМ-систем: объектном (объекты-близнецы), видовом (виды-близнецы), родовом (рода-близнецы). К видам-близнецам относятся виды ЭМПЭ, генетическая информация порождающих хромосом которых представлена генетическими кодами источников-изотопов [15]. Следует отметить, что подобная строгая корреляция между генотипом изотопов и видами-близнецами может иметь место только при условии наличия порождающей периодической системы элементов. Например, в биологической таксономии такая связь пока не установлена. Структурными эквивален-

тами источников-изомеров являются технически реализованные ЭМ-объекты близнецовых видов (полюсообразующие активные поверхности и распределенные обмотки, магнитные системы индукторов и якорей электрических машин, электромагнитные и электромеханические устройства и др.) (рис. 5).

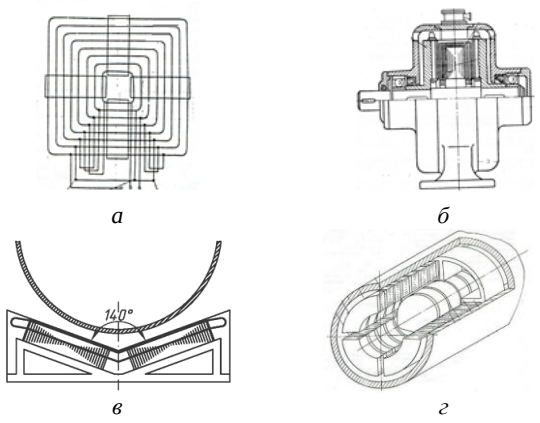


Рис. 5 – Примеры электромагнитных и электромеханических объектов-близнецов, выявленных по результатам информационного поиска: *а* – обмотка индуктора (представитель вида-близнеца ^{4}PL 2.0x);
б – электрическая вращающаяся машина (^{3}TP 0.2y);
в – устройство для транспортировки труб (^{1}PL 2.2x);
г – двигатель поступательного движения 4(^{1}CL 2.0x)

Достоверность положений теории структурной изотопии и степень ее проявления в технической эволюции ЭМ-объектов проверялась постановкой эволюционных экспериментов [21, 22]. В соответствии с программой эксперимент проводился в два этапа. Задача первого этапа заключалась в постановке серии геномно-исторических экспериментов с целью выявления объектов-близнецов и проверки их структурно-информационного соответствия. Конечная цель экспериментов второго этапа – целенаправленное введение в структурную эволюцию ЭМ-объектов и неявных видов, структуры которых выявлены и синтезированы на основе их генетических программ. Если эксперименты первого этапа используют информацию исторического прошлого исследуемой системы, то программа эволюционных экспериментов второго этапа оперирует информацией будущего, полученной по результатам генетического предвидения и материализованной в настоящем.

Серия экспериментов геномно-исторического уровня проводилась методом сопоставления данных патентно-информационного поиска с результатами идентификации генетических кодов обнаруженных объектов-близнецов. Поиск осуществлялся на глубину T_E = 80 лет. Генетические границы эксперимента охватывали три первых поколения источников-изотопов. По результатам геномно-исторического эксперимента было выявлено 43 структурных представителя, генетическая информация которых полностью совпала с генетическими кодами соответствующих источников-изотопов в структуре ГК (табл. 3).

Анализ результатов эксперимента показал, что подавляющее большинство видов-близнецов (90,28%) относятся к категории неявных, структурные представители которых еще отсутствуют на данное время их эволюции. В технической эволюции объектов электромеханики (T_E= 80 лет) задействованы структурные представители 7-ми видов-близнецов всех трех поколений из числа допустимых (ΣN_S = 72). Известные виды-близнецы находятся на ранней стадии эволюции и представлены единичными ЭМ-объектами.

Таблица 3 – Область существования генетического разнообразия видов-близнецов с отображением видов, исторически задействованных в технической эволюции

Подгруппа	Малый период																	
	CL			KN			PL			TP			SF			TC		
	Поколение источников-изотопов																	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.2y																		
2.0x																		
2.2y																		
2.2x																		

Эксперименты первого этапа подтвердили достоверность информации макрогенетических программ и корректность генетических принципов и моделей структурообразования видов-близнецов.

Эволюционные эксперименты второго этапа осуществлялись по программе геномно-прогностических экспериментов [21, 23]. Практическая реализация эксперимента предусматривала: расшифровку и анализ генетических программ соответствующих функциональных классов ЭМ-объектов; процедуру выбора порождающих структур из числа генетически допустимых; направленный синтез ЭМ-структур по результатам предвидения; разработку оригинальных технических решений и их патентование. Конечная цель таких экспериментов ориентирована на целенаправленное введение в эволюцию объектов и открытие новых информационных видов-близнецов из числа неявных, обнаруженных по результатам расшифровки генетических программ.

Для обеспечения чистоты эксперимента область синтеза была искусственно ограничена одним гомологическим рядом (H_{02y}) и одним поколением (третьим) источников-изотопов (табл. 4). Указанные ограничения обусловили направленность группового синтеза конкурентоспособных технических решений в пределах одного гомологического ряда (0.2y). Вполне очевидно, что реализация эксперимента в такой постановке возможна только при условии наличия генетической программы указанного ряда.

Таблица 4 – Генетическая карта ЭМ-объектов-близнецов, структурные представители которых синтезированы и введены в техническую эволюцию ЭМПЭ по их генетическим программам

Подгруппа	Малый период																	
	CL			KN			PL			TP			SF			TC		
	Поколение источников-изотопов																	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.2y																		
2.0x																		
2.2y																		
2.2x																		

Эксперимент осуществлялся последовательно для двух функциональных классов ЭМ-систем: класса асинхронных машин и класса электромеханических дезинтеграторов (ЭМД).

Практическое осуществление прогностического эксперимента эквивалентно реализации сценария управляемой эволюции путем одновременного ввода ($T_E \rightarrow min$) в структурную эволюцию конкурентоспособных групп ЭМ-объектов-близнецов, структуры которых идентифицированы и синтезированы по генетической программе идеального гомологического ряда (рис. 6) [24, 25].

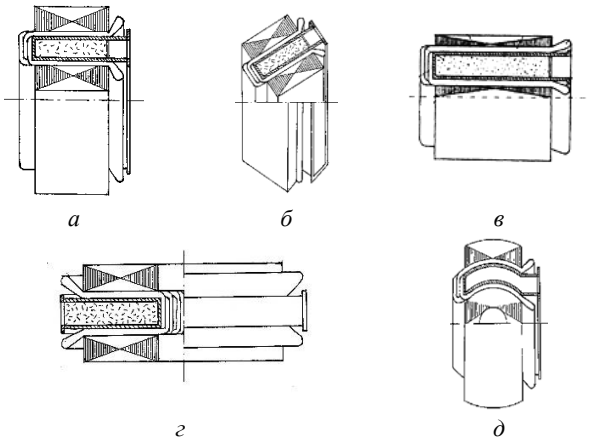


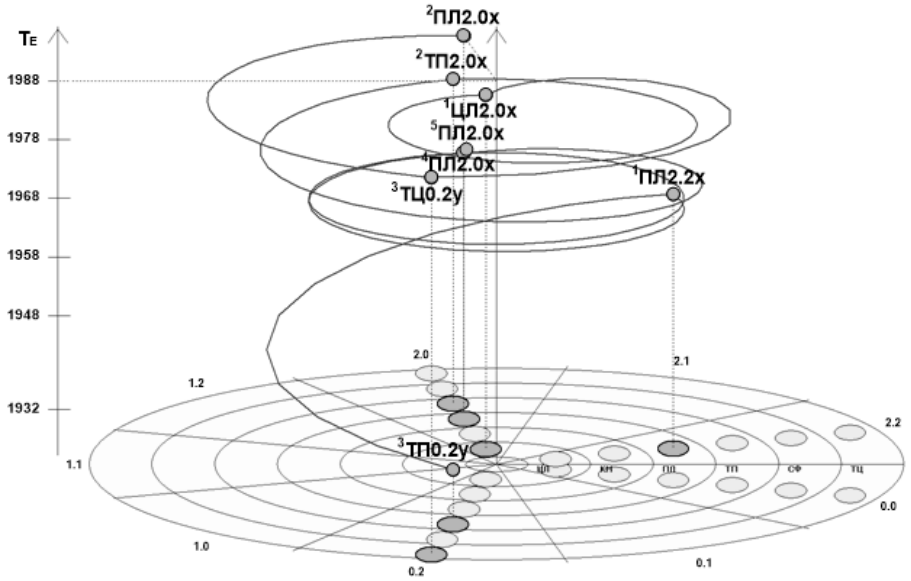
Рис. 6 – Объекты-близнецы (представители класса электромеханических дезинтеграторов), синтезированные на основе анализа генетической программы гомологического ряда $^3(H_{02y})$: *а* – $^3CL0.2y$; *б* – $^3KN\ 0.2y$; *в* – $^3PL0.2y$; *г* – $^3TP0.2y$; *д* – $^3SF0.2y$

По существу, указанные объекты можно рассматривать как первые в мире технические объекты-близнецы, синтезированные по их генетическим программам. Аналогичный по генетическому и видовому разнообразию ряд структур с обмотками-близнецами был синтезирован для функционального класса асинхронных машин. Сравнительный анализ результатов прогностического эксперимента (табл. 4) с данными исторического этапа видообразования (табл. 3) свидетельствует о факте ввода в эволюцию четырех новых видов-близнецов (^{3}CL0.2y, ^{3}KN 0.2y, ^{3}PL 0.2y и ^{3}SF 0.2y), которые до постановки экспериментов имели статус неявных видов.

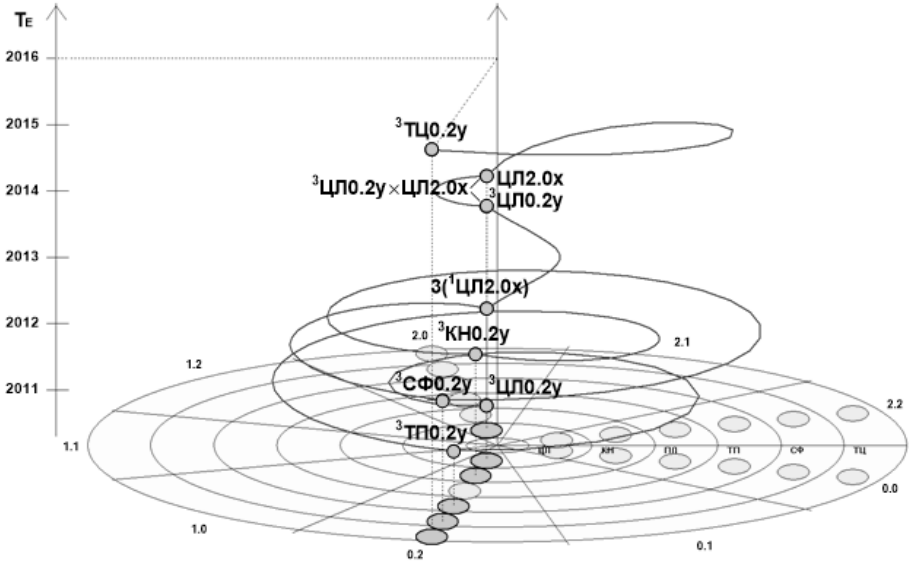
Результаты проведенных эволюционных экспериментов подтверждают достоверность теоретических положений, определяющих генетическую организацию и эволюцию структурной изотопии в ЭМ-системах. Результаты второго этапа экспериментов убедительно показывают возможность перехода от концепции наблюдаемой эволюции, т.е. от фиксации исторических событий к стратегии управляемой эволюции (генетические программы → предвидение → направленный синтез → инновации), которая обеспечивает существенное сокращение временных и материальных ресурсов на поисковые исследования. Если средний темп эволюции видов-близнецов за T_E = 80 лет исторического этапа составил 0,28 событий в год, то этот же показатель с применением технологии генетического предвидения и синтеза (T_E = 4 года) составил 6 событий в год (рис. 7). Из 6-ти синтезированных и введенных в техническую эволюцию близнецовых структур ЭМД четыре структуры являются представителями впервые открытых видов-близнецов.

Практическая значимость результатов исследований определяется разработкой генетических банков данных, систематизирующих информацию о генетически допустимом разнообразии источников-изотопов. Такие информационные системы, дополненные информацией о существующих видах объектов-близнецов, составляют информационную основу для реализации технологии структурного предвидения, осуществления направленного синтеза новых ЭМ-объектов, разработки систематики близнецовых ЭМПЭ и создания информационного обеспечения генетических банков инноваций для соответствующих функциональных классов ЭМ-объектов.

Системность изотопии (междисциплинарный аспект). Используя метод горизонтального (междисциплинарного) переноса генетической информации, можно осуществить сравнительный анализ особенностей проявления изотопии в развивающихся системах различной генетической природы. В табл. 5 обобщены сведения об изотопии как для систем с достаточно высоким уровнем их познания (химических, физических, лингвистических, электромагнитных), так и для систем с малоизученным, но прогнозируемым наличием указанного явления (музыкальных, числовых и фрактальных).



а



б

Рис. 7 – Макроэволюционные траектории процессов видообразования близнецовых ЭМ-объектов:
а – наблюдаемая эволюция (T_E = 80 лет, K_E = 0,28 соб./год);
б – управляемая эволюция по программе эволюционного эксперимента (T_E = 4 года, K_E = 6 соб./год)

Таблица 5 – Междисциплинарный анализ изотопии в генетически организованных системах различной физической природы

Природа ГОС	Порождающая система элементов	Природа полиморфизма	Изотопный эффект
Химическая	Система химических элементов	Массовая	Массовое число
		Магнитная	Магнитный момент
Элементарных частиц	Систематика элементарных частиц	Зарядовая	Изотопический спин
Электромагнитная	ГК первичных источников магнитного поля	Геометрическая	Пространственная геометрия
Лингвистическая	Порождающая грамматика	Семантическая	Семантический повтор
Музыкальная	Диатоника	Звуковая	Тембр звука
Математическая	Система натуральных чисел	Числовая	Дробное число
Фрактальная	*L*-система	Геометрическая	Дробная метрическая размерность

Результаты сравнительного анализа показывают, что для каждой ГОС природа полиморфизма и вид проявления изотопии специфичны. Вместе с тем анализ проявления изотопии в системах различной физической природы позволяет обобщить важные системные свойства этого явления:

- изотопия – фундаментальное свойство и необходимое условие структурной организации развивающихся систем как природного, так и антропогенного происхождения;

- в генетически организованных системах функцию системного носителя информации о структурном разнообразии изотопов выполняют порождающие системы первичных элементов определенной физической или абстрактной природы;

- вид изотопических вариаций (изотопный эффект) определяется физической природой полиморфизма элементного базиса ГОС;

- структуры-изотопы связаны между собой отношением гомеоморфизма, который одновременно определяет и методологию их синтеза;

- структуры изотопы наделены «генетической памятью» о своей порождающей системе;

- на эволюционных уровнях организации изотопия представлена соответствующими видами-близнецами.

Системность изотопии определяется ее непосредственной связью с элементно-информационным базисом ГОС, структурой групп и периодов порождающей системы первичных элементов, принципами сохранения симметрии и топологии ЭМ-структур, принципами кодирования и сохранения генетической информации, генетическими программами структурообразования сложных систем, таксономическими категориями и реальными процессами структурной эволюции развивающейся системы.

Проявление системности структурной изотопии обуславливает необходимость ее рассмотрения в непосредственной взаимосвязи с другими принципами структурообразования, равно как и изучение других фундаментальных явлений (периодичности, гомологии, самоподобия, парности и др.) невозможно осуществлять вне связи с изотопией. В структурной организации ГОС отсутствуют порождающие структуры без изотопии, как и не существует объектов, не имеющих своих близнецовых форм, возникающих в процессе структурной эволюции.

Системная природа изотопии обуславливает необходимость ее распространения на другие развивающиеся технические системы. Исследование структурной изотопии в технических системах и ее практические приложения находится еще на начальном этапе. В данной статье результаты практической реализации структурной изотопии ограничены объектами электромеханики. Однако область приложения структурной изотопии, по убеждению авторов статьи, намного шире. Вне рассмотрения остаются вопросы взаимосвязи порождающих множеств изотопов ГК с функциональными классами сложных электромагнитных систем специального назначения (токамаков, стеллараторов, коллайдеров, сверхпроводящих магнитных систем, устройств магнитной левитации и др.), где исследователей изотопии еще ждут новые открытия и научные обобщения.

Явление изотопии ЭМ-структур согласуется с законом генетического разнообразия: генетически запрограммированное многообразие изначальных форм на элементном уровне (генетический полиморфизм) – необходимое условие устойчивого развития генетически организованной системы в конкурентной борьбе за существование.

Выводы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что явление изотопии относится к общесистемным принципам, определяющим фундаментальные свойства генетически организованных систем как природного, так и антропогенного происхождения. Структуры-изотопы имеют генетическую природу, а их разнообразие, свойства, элементный состав и информационный базис определяются периодической структурой соответствующей порождающей системы. Изотопия выступает важным источником структурообразования и представляет собой высокоупорядоченную информационную основу для реализации технологии генетического предвидения на всех уровнях структурной организации сложных развивающихся ЭМ-систем.

Изотопия электромеханических структур отображает общесистемное свойство геометрического полиморфизма первичных источников электромагнитного поля, определяющих структурную эволюцию электромеханических преобразователей энергии близнецовых видов.

Открытие явления изотопии в электромеханических структурах еще раз подтверждает фундаментальность и достоверность генетической классификации первичных источников электромагнитного поля и ее системообразующую роль в методологии структурно-системных исследований.

Список литературы

1. *Пригожин И. Р., Стенгерс И.* Время, хаос, квант. К решению парадокса времени / *И. Р. Пригожин, И. Стенгерс*. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 240 с.
2. *Шинкаренко В. Ф.* Основи теорії еволюції електромеханічних систем / *В. Ф. Шинкаренко*. – К.: Наукова думка, 2002. – 288с.
3. *Джуа М.* История химии / *М. Джуа*. – М.: Мир, 1975. – 478с.
4. Greenaway F. IUPAC. Science International: A History of the International Council of Scientific Unions / F. Greenaway. – Cambridge University Press, 2006. – 292 p.
5. *Семишин В. И.* Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева / *В. И. Семишин*. – М.: Изд-во «Химия», 1972. – 188 с.
6. *Бучаченко А. Л.* Магнитная изотопия: новые горизонты / *А. Л. Бучаченко* // Вестник РАН. – 2010. – Т. 80, № 2. – С. 107-113.
7. *Шуколюков Ю. А.* Звездная пыль в руках / *Ю. А. Шуколюков* // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №7. – С. 74-80.
8. *Житомирский О. К.* Задачи по высшей геометрии. Ч. I. / *О. К. Житомирский, В. Д. Львовский, В. И. Милинский*. – Л. – М.: ОНТИ, 1935. – 306с.
9. *Франсис Дж.* Книжка с картинками по топологии / *Дж. Франсис*. – М.: Мир, 1991. – 240 с.
10. *Greimas A. J.* Sêmantique strukturale. Recherche de mêthode / *A. J. Greimas*. – Paris, 1966. – 262 p.
11. *Швебер С.* Введение в релятивистскую квантовую теорию поля / *С. Швебер*. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1963. – 303 с.
12. *Hawking S.* Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes / *S. Hawking*. – Publisher: «Bantam Books», 1998. – 256 p.

13. *Бучаченко А. Л.* Новая изотопия в химии и биохимии / *А. Л. Бучаченко*. – М.: Наука, 2007. – 189 с.
14. *Вернадский В. И.* Изотопы и живое вещество / *В. И. Вернадский* // Докл. АН СССР. Сер. А. – 1926. – С. 215-218.
15. *Иванов А. А.* Зависит ли конформация ДНК от различия изотопных составов ее нитей? / *А. А. Иванов* // Химическая физика. – 2007. – Т. 26, № 11. – С. 57-60.
16. *Шинкаренко В. Ф.* Словник із структурної і генетичної електромеханіки / *В. Ф. Шинкаренко, А. А. Шиманська*. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 112 с.
17. *Алексеев Е. Б.* Ботаническая номенклатура / *Е. Б. Алексеев, И. А. Губанов, В. Н. Тихомиров*. – М.: Издательство МГУ, 1989. – 168 с.
18. *Прасолов В. В.* Наглядная топология / *В. В. Прасолов*. – М.: МЦНМО, 2006. – 112 с.
19. *Урманцев Ю. А.* Симметрия природы и природа симметрии (философские и естественнонаучные аспекты) / *Ю. А. Урманцев*. – М.: Мысль, 1974. – 229 с.
20. *Шинкаренко В. Ф.* Розпізнавання генетичних програм функціонального класу складних електромеханічних систем за інформацією його довільного представника / *В. Ф. Шинкаренко, Ю. В. Гайдаєнко, Л. М. Кобзенко, П. В. Отрішко* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – № 1. – С. 57 – 65.
21. *Shinkarenko V. F.* Evolutionary Experiments in Genetic Electromechanics / *V. F. Shinkarenko, I. A. Shvedchikova, V. V. Kotlyarova* // 13th Anniversary International scientific Conference «Unitech'13». 22-23 November, 2013. – Gabrovo, Bulgaria. – 2013. – Vol. III. – P. 289-294.
22. *Шведчикова И. А.* Эволюционно-экспериментальные исследования функционального класса магнитных сепараторов / *И. А. Шведчикова* // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. – 2013. – Вип. 13, т. 4. – С. 96-103.
23. *Шинкаренко В. Ф.* Структурний синтез складних електромашинних агрегатів з використанням їх генетичних програм / *В. Ф. Шинкаренко, А. А. Шиманська, Ю. В. Гайдаєнко* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: **"**Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії**"**. – 2016. – № 11 (1183). – С. 93-101.
24. Патент України на винахід № 97572, МПК H02K 41/025, B01F 13/08. Електромеханічний дезінтегратор / Шинкаренко В. Ф., Шиманська А. А., Лисак В. В.; патентовласник: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; заявл. 28. 07. 2010; опубл. 27. 02. 2012, Бюл. № 4.
25. *Шинкаренко В. Ф.* Определение и анализ генетических программ совмещенных электромеханических систем типа «мотор-подшипник» с газомагнитным подвесом ротора / *В. Ф. Шинкаренко, В. В. Котлярова, А. А. Шиманская* // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: «Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии». – 2015. – № 5(1114). – С. 96-101.

References (transliterated)

1. Prigozhin I. R., Stengers I. *Vremja, haos, kvant. K resheniju paradoksa vremeni* [Time, chaos, quantum. Solution of the time paradox], Moscow, Editorial URSS, 2003, 240 p.
2. Shynkarenko V. F. *Osnovy teorii' evoljucii' elektromehanichnyh system* [The basis of the evolution theory of electromechanical systems], Kiev, Naukova dumka, 2002, 288 p.
3. Dzhua M. *Istorija himii Dzhua* [History of Chemistry], Moscow, Mir, 1975, 478 p.
4. Greenaway F. *IUPAC. Science International: A History of the International Council of Scientific Unions. Cambridge University Press*, 2006, 292 p.
5. Semishin V. I. *Periodicheskaja sistema himicheskih jelementov D. I. Mendeleeva* [Periodic system of chemical elements of D. I. Mendeleyev], Moscow, Izd-vo «Himija», 1972, 188 p.
6. Buchachenko A. L. Magnitnaja izotopija: novye gorizonty [Magnetic isotropy: new horizons]. *Vestnik RAN*. 2010, T. 80, no. 2, pp. 107-113.
7. Shukoljukov Ju. A. Zvezdnaja pyl' v rukah [Stardust in the hands]. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*. 1996, no. 7, pp. 74-80.
8. Zhitomirskij O. K., L'vovskij V. D., Milinskij V. I. *Zadachi po vysshej geometrii. Ch. I.* [Higher Geometry tasks], Moscow, ONTI, 1935, 306 p.
9. Fransis Dzh. *Knizhka s kartinkami po topologii* [A book with pictures by topology], Moscow, Mir, 1991, 240 p.
10. Greimas A. J. *Sêmantique strukturale. Recherche de mêthode*, Paris, 1966, 262 p.
11. Shveber S. *Vvedenie v reljativistskuju kvantovuju teoriju polja* [Introduction to relativistic quantum field theory], Moscow, Izd-vo inostr. literatury, 1963, 303 p.
12. Hawking S. *Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*, Publisher: «Bantam Books», 1998, 256 p.
13. Buchachenko A. L. *Novaja izotopija v himii i biohimii* [A new isotopy in chemistry and biochemistry], Moscow, Nauka, 2007, 189 p.
14. Vernadskij V. I. Izotopy i zhivoe veshhestvo [Isotopes and living matter]. *Dokl. AN SSSR. Ser. A*, 1926, pp. 215-218.
15. Ivanov A. A. Zavisit li konformacija DNK ot razlichija izotopnyh sostavov ee nitej? [Does the conformation of DNA depend on the difference in the isotopic composition of its filaments?]. *Himicheskaja fizika*. 2007, T. 26, no. 11, pp. 57-60.
16. Shynkarenko V. F., Shymans'ka A. A. *Slovnyk iz strukturnoi' i genetychnoi' elektromehaniky* [Dictionary of structural and genetic electromechanics], Kiev, NTUU «KPI», 2015, 112 p.
17. Alekseev E. B., Gubanov I. A., Tihomirov V. N. *Botanicheskaja nomenklatura* [Botanical nomenclature], Moscow, Izdatel'stvo MGU, 1989, 168 p.
18. Prasolov V. V. *Nagljadnaja topologija* [Visual topology], Moscow, MCNMO, 2006, 112 p.
19. Urmancev Ju. A. *Simmetrija prirody i priroda simmetrii (filosofskie i estestvennonauchnye aspekty)* [Symmetry of nature and the nature of symmetry (philosophical and natural-science aspects)], Moscow, Mysl', 1974, 229 p.
20. Shynkarenko V. F., Gajdajenko Ju. V., Kobzenko L. M., Otrishko P. V. Rozpiznavannja genetychnyh program funkcional'nogo klasu skladnyh elektromehanichnyh system za informacijeju jogo dovil'nogo predstavnyka [Recognition of genetic programs of the functional class of complex electromechanical systems byinformation of its arbitrary representative]. *Elektromehanichni i energozberigajuchi systemy*. 2014, no. 1, pp. 57–65.
21. Shinkarenko V. F., Shvedchikova I. A., Kotlyarova V. V. Evolutionary Experiments in Genetic Electromechanics. *13th Anniversary International scientific Conference «Unitech'13»*. 22-23 November, 2013, Vol. III, pp. 289-294.
22. Shvedchikova I. A. Evolyutsionno-eksperimental'nyye issledovaniya funktsional'nogo klassa magnitnykh separatorov [Evolutionary-experimental studies of the functional class of magnetic separators]. *Pratsi Tavriys'koho derzhavnoho ahrotekhnichnoho universytetu*. 2013, issue 13, vol. 4, pp. 96-103.
23. Shynkarenko V. F., Shymans'ka A. A., Gajdajenko Ju. V. Strukturnyy syntez skladnykh elektromashynnykh ahrehativ z vykorystannyam yikh henetychnykh prohram [Structural synthesis of complex electric machines aggregates using their genetic program]. *Visnik NTU «HPI». Harkiv: NTU «HPI» – Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI"*, 2016, no. 11 (1183), pp. 93-101.
24. Shynkarenko V. F., Shymans'ka A. A., Lysak V. V. Patent Ukrai'ny na vynahid № 97572. *Elektromehanichnyj dezintegrator* [Electromechanical disintegrator], patentovlasnyk: Nacional'nyj tehnichnyj universytet Ukrai'ny «Kyi'vs'kyj politehnichnyj instytut»; zajavl. 28. 07. 2010; opubl. 27. 02. 2012, Bjul. № 4.
25. Shinkarenko V. F., Kotlyarova V. V., Shymans'ka A. A. Opredeleniye i analiz geneticheskikh programm sovmeshchennykh elektromekhanicheskikh sistem tipa «motor-podshipnik» s gazomagnitnym podvesom rotora [Determination and analysis of genetic programs of combined electromechanical systems of the "motor-bearing" type with a gas-magnetic suspension of the rotor]. *Visnik NTU «HPI». Harkiv: NTU «HPI» – Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI"*, 2015, no. 5 (1114), pp. 96-101.

Поступила (received) 02.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Ізотопія в структурній організації і еволюції електромеханічних перетворювачів енергії / В. Ф. Шинкаренко, І. О. Шведчикова, В. В. Котлярова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 14–25. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2409-9295.

Изотопия в структурной организации и эволюции электромеханических преобразователей энергии / В. Ф. Шинкаренко, И. А. Шведчикова, В. В. Котлярова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 14–25. – Бібліогр.: 25 назв. – ISSN 2409-9295.

The isotopy in the structural organization and evolution of electromechanical energy converters / V. Shynkarenko, I. Shvedchykova, V. Kotlyarova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 14–25. – Bibliogr.: 25. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шинкаренко Василь Федорович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри електромеханіки, тел. (044)204-95-18; e-mail: svf1102@gmail.com.

Шинкаренко Василий Федорович, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», заведующий кафедры электромеханики, тел. (044)204-95-18; e-mail: svf1102@gmail.com.

Shynkarenko Vasyl Fedorovych, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Chair of the Department of Electromechanics, tel. +38 (044) 204-95-18; e-mail: svf1102@gmail.com.

Шведчикова Ірина Олексіївна, доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, професор кафедри електроніки та електротехніки, тел. (044)256-29-65, e-mail: ishved@i.ua.

Шведчикова Ирина Алексеевна, доктор технических наук, профессор, Киевский национальный университет технологий и дизайна, профессор кафедры электроники и электротехники, тел. (044) 256-29-65, e-mail: ishved@i.ua.

Shvedchykova Iryna Oleksiivna, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kyiv National Technical University of Technologies and Design, Professor of the Department of Electronics and Electrical Engineering, tel. +38 (044)256-29-65, e-mail: ishved@i.ua.

Котлярова Вікторія Володимирівна, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», асистент кафедри електромеханіки, тел. (050) 995-20-28; e-mail: sharik_2004@ukr.net.

Котлярова Виктория Владимировна, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ассистент кафедры электромеханики, тел.(050) 995-20-28; e-mail: sharik_2004@ukr.net.

Kotliarova Viktoriia Volodymyrivna, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Assistant of the Department of Electromechanics, tel. +38 (055) 995-20-28; e-mail: sharik_2004@ukr.net.

УДК 621.313

В.В. РЫМША, И.Н. РАДИМОВ, М.В. ГУЛЫЙ,
И.П. БАБИЧ, А.А. КАЛИНИЧЕНКО, С.А. ФОКИН

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННОЙ СИСТЕМЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Наведено результати розробки та практичної реалізації електромеханотронної системи малої потужності, яка містить безконтактний електродвигун та кульково-хвильовий редуктор. Створено математичну модель електромеханотронної системи у середовищі Matlab-Simulink, яка дозволяє розрахувати параметри та характеристики системи. Виготовлено макетний зразок, випробування якого підтвердили працездатність розробленої електромеханотронної системи.

Ключові слова: вентильний двигун з постійними магнітами, кульково-хвильовий редуктор, давач положення ротору, регулятор швидкості, метод скінченних елементів, математична модель, механічна характеристика, електромеханічна характеристика.

Представлены результаты разработки и практической реализации электромеханотронной системы малой мощности, в состав которой входят бесконтактный электродвигатель и шарико-волновой редуктор. Создана математическая модель электромеханотронной системы в среде Matlab-Simulink, позволившая рассчитать параметры и характеристики системы. Изготовлен макетный образец, испытания которого подтвердили работоспособность разработанной электромеханотронной системы.

Ключевые слова: вентильный двигатель с постоянными магнитами, шарико-волновой редуктор, датчик положения ротора, регулятор скорости, метод конечных элементов, математическая модель, механическая характеристика, электромеханическая характеристика**.**

Purpose. Presentation of the results of development and practical implementation of an an electromechanotronic system of low power, which includes a brushless electric motor and a ball-wave gear. **Methodology.** The calculations of the magnetic fields of the motor are carried out with the finite elements method by FEMM program. The calculations of the characteristics of the system are carried out with the Matlab-Simulink simulation model. **Results.** As a result of calculations, the mechanical and electromechanical characteristics of the electromechanotronic system, which is designed, was obtained. Tests of the prototype model of the electromechanotronic system confirmed the principle workability of the adopted design and design solutions in its development. **Originality.** The use of the compact ball-wave gear and effective brushless motor are allowed to create small-size electromechanotronic system with maximum torque 30 Nm and rotation speed 50 rpm. **Practical value.** The developed electromechanotronic system, through a combination of the brushless motor and ball-wave gear, provides high accuracy and smooth movement of the working body, have a high energy and mass-dimensions.

Keywords: brushless motor, ball-wave gear, rotor position sensor, speed controller, finite elements method, mathematical model, mechanical characteristic, electromechanical characteristic.

Введение. Во многих областях промышленности широко применяются электромеханотронные системы (ЭМС), представляющие собой объединение бесконтактной электрической машины и механического преобразователя [1, 2]. Ряд таких применений требует обеспечения больших моментов при низкой частоте вращения, высокой точности и плавности перемещения рабочего органа, надежности в эксплуатации, высоких энергетических и минимальных массо-габаритных показателей.

Обеспечение данных требований возможно на основе комбинации вентильного двигателя с постоянными магнитами (ВДПМ) и шарико-волнового редуктора (ШВР), представляющего собой волновую передачу с промежуточными телами качения. Известно, что такие передачи имеют КПД, достигающий 90%, и отличаются высокой несущей способностью и износостойкостью [3].

В настоящей статье представлены результаты разработки и тестирования одного из вариантов такой ЭМС малой мощности с максимальным моментом 30 Нм при частоте вращения 50 об/мин, работающей в повторно-кратковременном режиме.

Объект исследования. Разработанная ЭМС состоит из:

- интегрированного электромеханического преобразователя (ЭМП) (рис. 1), в состав которого входят ВДПМ с датчиком положения ротора (ДПР) и ШВР. Вентильный двигатель, благодаря использованию высококоэрцитивных постоянных магнитов на роторе, обладает хорошими эксплуатационным характеристикам и является одной из наиболее перспективных электрических машин в диапазоне малых и средних мощностей [4]. Такой электродвигатель обладает более высоким отношением номинального момента к массе, чем регулируемые двигатели иных конструкций;
- регулятора скорости (РС) вращения выходного вала ВДПМ, который выполнен в виде отдельного блока, на вход которого с ДПР поступает сигнал о положении ротора θ.

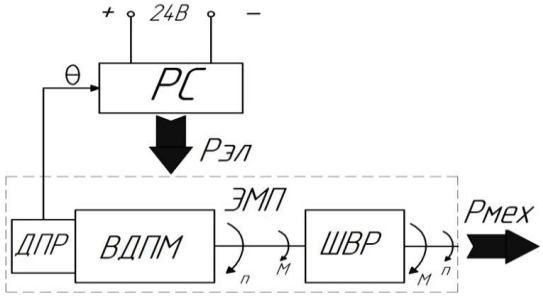


Рис. 1 – Функциональная схема ЭМС

Цель исследования. Целью работы является математическое моделирование и экспериментальные исследования разработанной ЭМС.

Шарико-волновой редуктор. Принципиальная конструктивная схема ШВР приведена на рис. 2.

© В.В.Рымша,И.Н. Радимов, М.В.Гулый, И.П. Бабич, А.А. Калиниченко, С.А. Фокин, 2018

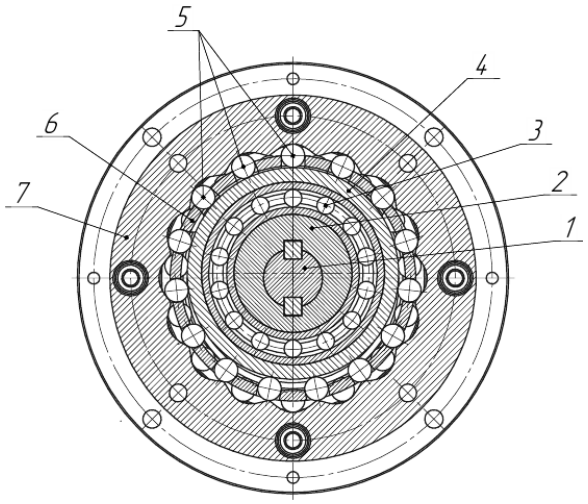


Рис. 2 – Принципиальная конструктивная схема ШВР

Вал *1* приводного ВДПМ, вращаясь, с помощью эксцентричного механизма (волнообразователя), содержащего эксцентрик *2*, подшипник *3* и кольцо *4*, вызывает радиальное перемещение шариков *5* (тел качения) в пазах сепаратора *6*. Создается эффект «волны», бегущей по цепочке сепарированных тел качения, т.е. эта цепочка является аналогом гибкого элемента в классических волновых схемах. Тела качения, контактируя с наклонными рабочими поверхностями кулачковых секторов заторможенного венца *7*, вызывают вращение сепаратора *6*. Редукция скорости вращения сепаратора при заторможенном венце определяется количеством тел качения.

Также возможна конструкция ШВР, в которой заторможен сепаратор 6, а вращается венец *7*. В этом случае при заторможенном сепараторе передаточное отношение равно числу кулачковых секторов венца.

В конструкции ШВР нагрузка передается с помощью шариков с общим углом зацепления от $\pi/2$ до π. Например, при общем числе тел качения, равном 17, в зацеплении одновременно находится до 8 тел качения, что позволяет передавать большие крутящие моменты при малых массогабаритных показателях.

Для обеспечения требуемого максимального момента нагрузки $M_{\max} = 30$ Н·м и приемлемой величины частоты вращения ВДПМ по методике [5] был спроектирован одноступенчатый ШВР с передаточным отношением $i_g = 17$, числом выступов венца 18, числом шариков 17, диаметром шариков 5 мм, числом рядов редуктора 2. Расчетный КПД редуктора $\eta_g = 0{,}85$.

Вентильный двигатель с постоянными магнитами. Исходя из требуемых выходных характеристик ЭМС при максимальном моменте нагрузки $M_{\max} = 30$ Н·м электродвигатель должен обеспечивать электромагнитный момент $M_{\text{ВДПМ}} = \dfrac{M_{\max}}{i_g \cdot \eta_g} = \dfrac{30}{17 \cdot 0{,}85} = 2{,}1$ Н·м при частоте вращения 850 об/мин. При этом масса ВДПМ должна быть минимально возможной. С этой целью при проектировании ВДПМ выбрана многополюсная конструкция с числом полюсов 28, отличающаяся малой высотой спинок статора и ротора. Обмотка двигателя выполнена трехфазной с сосредоточенными катушками на каждом из 24 зубцов магнитопровода статора.

В результате проектирования были получены геометрические размеры активной части ВДПМ, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Геометрические размеры активной части ВДПМ

Наименование	Величина
Внешний диаметр статора, мм	80
Внутренний диаметр статора, мм	56
Число пазов статора	24
Число полюсов ротора	28
Зазор между статором и ротором, мм	0.2
Длина пакета статора, мм	25
Высота магнитов, мм	1,9
Ширина магнитов, мм	4,5

Для выбранной конструкции ВДПМ с геометрическими размерами из табл. 1 выполнены расчеты магнитного поля методом конечных элементов в программе FEMM [6] (рис. 3). По результатам расчетов магнитного поля оценивается степень насыщения участков магнитной цепи ВДПМ, рассчитывается электромагнитный момент, действующий на ротор (статор) ВДПМ, потокосцепление и индуктивность обмотки статора, момент инерции ротора и другие данные, необходимые для определения характеристик ВДПМ.

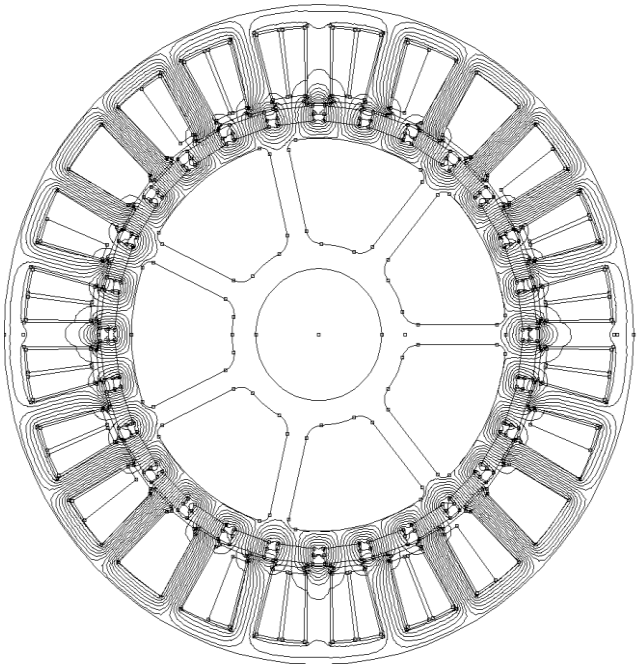


Рис. 3 – Магнитное поле ВДПМ

Датчик положения ротора. Для контроля положения ротора в корпусе ВДПМ установлен датчик

AS5074P. Выбор датчика AS5047P обусловлен следующим:

- высокое быстродействие датчика. Максимальная задержка на обновление текущей информации о положении ротора составляет 100 мкс;
- устойчивость к внешним воздействиям: пыли, влаге, вибрациям, а также функционирование в диапазоне рабочих температур от −40°C до +125°C;
- разрешающая способность датчика (14 бит), что позволяет с высокой точностью определять положение ротора, вычислять скорость вращения и устанавливать углы коммутации фаз ВДПМ.

Регулятор скорости. РС представляет собой систему подчиненного регулирования координат, реализованную в программном виде на микроконтроллере TMS320. Логика коммутации транзисторов осуществляет 120-градусную коммутацию фаз ВДПМ с зависимым от скорости опережением включения фаз. Регулирование тока ВДПМ ствляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) Mosfet-транзисторами трехфазного инвертора напряжения. На вход РС поступает сигнал задания частоты вращения в виде управляющего тока в диапазоне ±20 мА. При этом отрицательные значения управляющего тока соответствуют вращению вала ШВР по часовой стрелке, а положительные – против часовой стрелки.

Результаты исследований. Характеристики ЭМС рассчитываются с использованием математической модели ВДПМ среды Matlab-Simulink [7] с учетом особенностей разрабатываемой ЭМС. Структурная схема модели приведена на рис. 4. Модель содержит следующие функциональные блоки: ЭМС, задания частоты вращения, нагрузки. Блок ЭМС содержит модели трехфазного ВДПМ, управляемого Mosfet-инвертора с логикой коммутации силовых транзисторов, ПИ-регулятора тока ВДПМ (рис. 5).

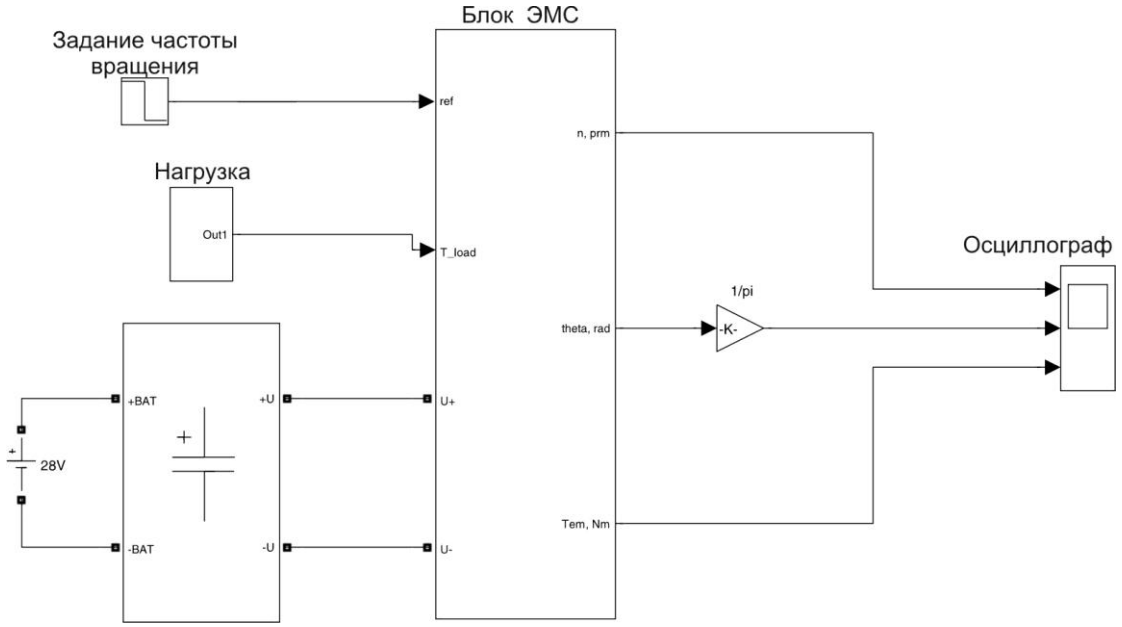


Рис. 4 – Структурная схема модели ЭМС

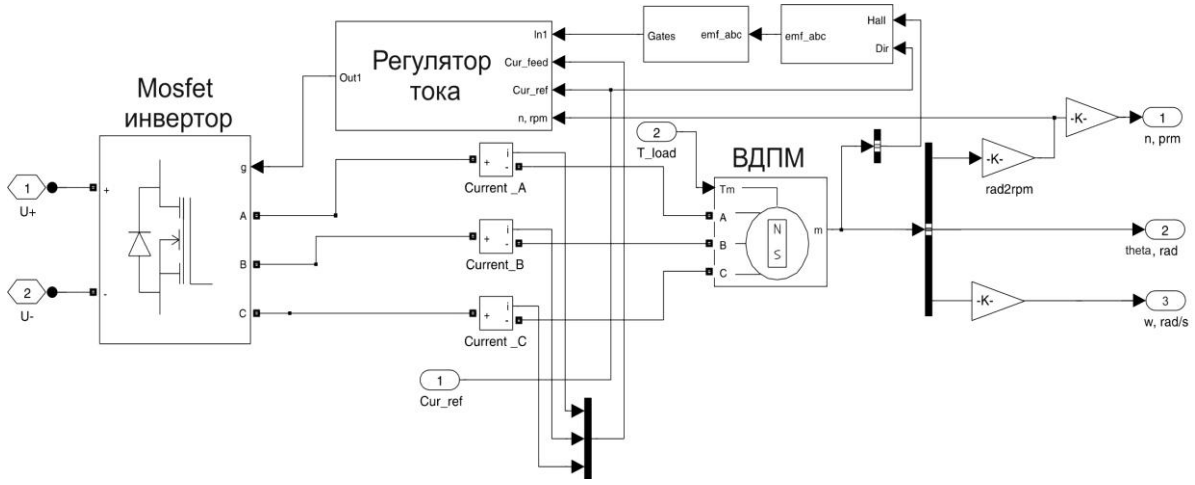


Рис. 5 – Структурная схема блока ЭМС

Модель управляемого Mosfet-инвертора с логикой коммутации позволяет учесть потери в силовых транзисторах и обратных диодах при двигательном и генераторном режимах работы ВДПМ.

В результате расчета магнитного поля и моделирования в среде Matlab-Simulink определены основные параметры и характеристики ВДПМ (табл. 2).

Таблица 2 – Параметры и характеристики ВДПМ

Наименование	Значение
Напряжение питания, В	24
Коэффициент момента, Н·м/А	0,152
Номинальный момент, Н·м	0,7
Номинальная частота вращения, мин$^{-1}$	1390
Номинальная мощность, Вт	100
Сопротивление обмотки, Ом	0,24
Индуктивность обмотки, мГн	0,26
Электромагнитная постоянная времени, мс	1,1
Момент инерции ротора, кг·м^2	$1{,}02\cdot10^{-4}$
Электромеханическая постоянная времени, мс	1,06

На рис. 6 представлен переходный процесс пуска ЭМС без нагрузки. Видно, что за время 6 мс частота вращения вала ШВР достигает значения 53,5 об/мин, что составляет около 63 % от установившейся частоты вращения, что свидетельствует о высоком быстродействии разработанной системы.

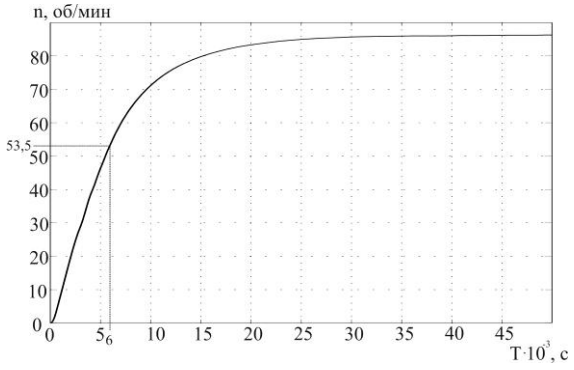


Рис. 6 – Переходный процесс пуска ЭМС до максимальной частоты вращения без нагрузки

Для оценки уровня перерегулирования по скорости ЭМС выполнено моделирование процесса разгона до частоты вращения выходного вала 25 об/мин при нагрузке 20 Н·м (рис. 7). Данная зависимость, как и зависимость на рис. 6, демонстрирует отсутствие перерегулирования при выходе на заданную частоту вращения, что является важным показателем для следящих электроприводов, требующих плавности движения исполнительного механизма.

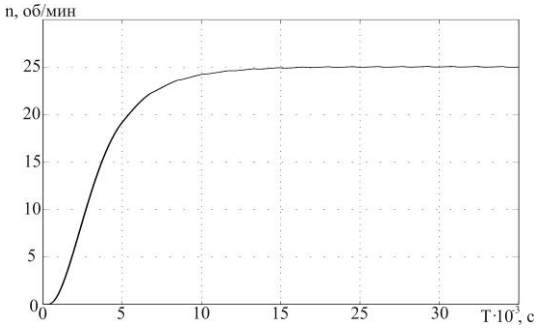


Рис. 7 – Переходный процесс разгона ЭМС при нагрузке

С целью проверки полученных при проектировании и моделировании результатов, а также для оценки работоспособности ШВР, требующего высокой точности изготовления волнообразователя и венца, был изготовлен макетный образец разработанной ЭМС, конструктивная схема ЭМП которого приведена на рис. 8, а общий вид образца ЭМС – на рис 9.

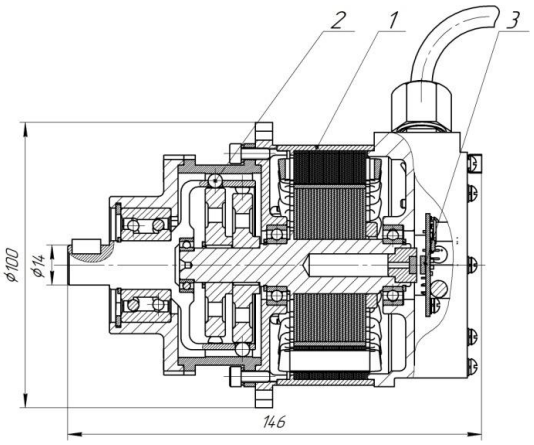


Рис. 8 – Конструктивная схема ЭМП: *1* - ВДПМ; *2* -ШВР; *3* - ДПР

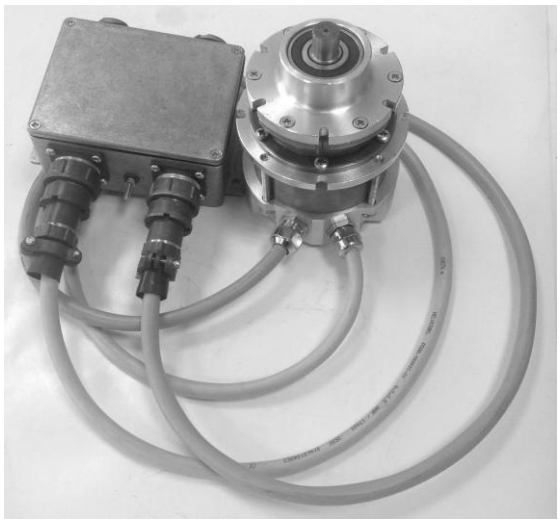


Рис. 9 – Макетный образец ЭМС

Испытания макетного образца ЭМС были проведены в сертифицированном научно-техническом

центре «Станкосерт» (г. Одесса) на устройстве создания и измерения момента Magtrol.

Также на экспериментальном стенде были сняты электромеханические характеристики ЭМС и отдельно ВДПМ.

В результате испытаний была получена механическая характеристика ВДПМ (рис. 10) и ЭМС (рис. 11).

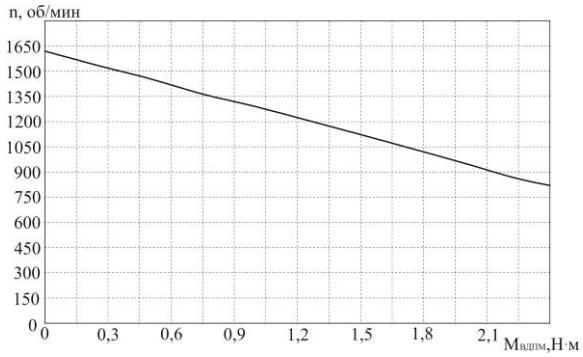


Рис. 10 – Механическая характеристика ВДПМ

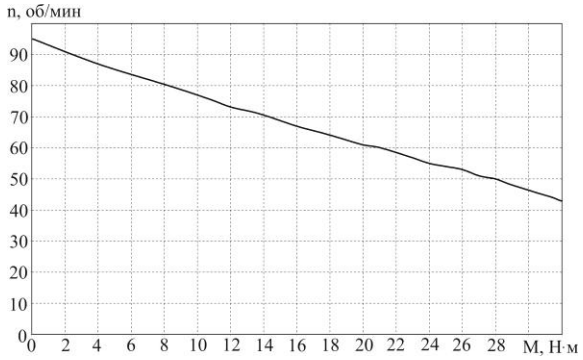


Рис. 11 – Механическая характеристика ЭМС

Из рис. 11 следует, что при требуемом моменте 30 Н·м частота вращения выходного вала ЭМС составляет 47,5 об/мин. Это на 5 % меньше расчетной частоты вращения, равной 50 об/мин.

На рис. 12 представлены электромеханические характеристики ЭМС и ВДПМ при условии приведения момента ВДПМ к выходному валу, считая, что КПД редуктора равен 1.

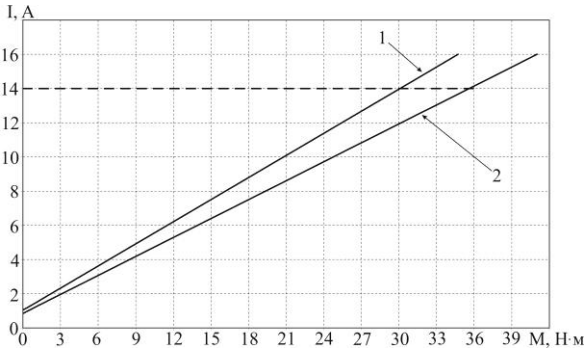


Рис. 12 – Электромеханические характеристики:
1 – ЭМС, *2* - ВДПМ

Данное приведение момента, полученное в результате умножения момента ВДПМ на передаточное отношение ШВР, позволяет определить КПД ШВР в зависимости от нагрузки на валу ЭМС. Так, например, при токе ЭМС 14 А момент на валу ЭМС равен 30 Н·м, а приведенный момент ВДПМ – 36 Н·м. Тогда КПД ШВР при моменте нагрузки, равном 30 Н·м, определяется отношением момента нагрузки к приведенному моменту ВДПМ, а именно: 30 / 36 = 0,833. Полученная таким образом зависимость КПД ШВР от момента нагрузки представлена на рис. 13.

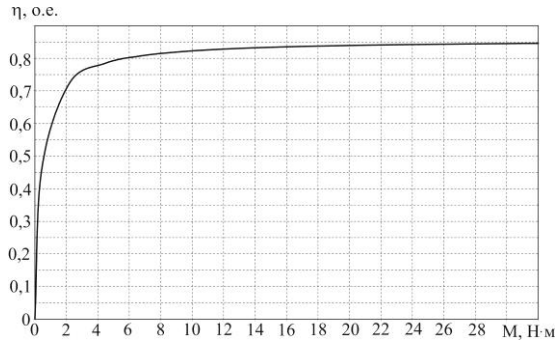


Рис. 13 – Зависимость КПД ШВР от момента нагрузки

Вид данной зависимости характерен для устройств преобразования энергии, к примеру, для трансформатора электрической энергии. В диапазоне нагрузок от 6 Н·м до 30 Н·м КПД ШВР находится в пределах 0,8−0,85, что несколько меньше КПД ШВР, известных из литературных источников. В дальнейшем, при изготовлении опытного образца ШВР, для достижения большего значения КПД, необходимо совершенствовать технологию изготовления деталей редуктора.

Выводы.

1. Разработана электромеханическая система, состоящая из вентильного электродвигателя с постоянными магнитами, шарико-волнового редуктора и системы регулирования скорости, обеспечивающая максимальный момент 30 Н·м при частоте вращения выходного вала 47,5 об/мин.

2. В среде Matlab-Simulink, с учетом особенностей разработанной ЭМС, создана математическая модель, использующая результаты расчета магнитного поля вентильного электродвигателя, выполненные методом конечных элементов. Модель позволила рассчитать параметры и характеристики как ВДПМ, так и ЭМС в целом.

3. Спроектирован и изготовлен макетный образец малогабаритного ШВР с передаточным отношением 17.

4. Изготовлен макетный образец разработанной ЭМС с габаритами ЭМП 146мм×100мм и массой 2,7 кг. Результаты испытаний макетного образца ЭМС показали его работоспособность и позволили определить КПД ШВР от момента нагрузки.

Список литературы

1. Ткачук В. І. Електромеханотроніка / В. І. Ткачук. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.
2. Карнаухов Н. Ф. Электромеханические и мехатронные системы / Н. Ф. Карнаухов. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 320 с.
3. Хохряков Б. Г. Электроприводы нового поколения для запорно-регулирующей арматуры / Б. Г. Хохряков // Арматуростроение. – 2004. - № 4 (30). – С.32-33.
4. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И. Е. Овчинников: Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век, 2007. – 336 с.
5. Маргулис Б. Г. Методика определения основных параметров силовой волновой передачи с промежуточными телами качения / Б. Г. Маргулис, А. С. Шайда // Машинобудування. Вісник приазовського державного технічного університету. – 2008. Вип. 18. – С. 125-128.
6. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. – Режим доступа: http://www.femm.info/wiki/OldVersions. Дата обращения 10 марта 2014 г.
7. Черных И. В. Моделирование электромеханических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс: СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

References (transliterated)

1. Tkachuk V. I. Electromechanotronica [Electromechanotronic]. Lviv: Publishing house of the National University of “Lviv Polytechnic”, 2006. – 440 p.
2. Karnauchov N. F. Electromexanicheskie i mexatronnie systemy [Electromechanical and mechatronic systems]. Rostov-on-Don: Feniks, 2006. – 320 p.
3. Hohryakov B. G. Elektroprivody novogo pokoleniya dlya zaporno-reguliruyuchey armaturi [New-generation electric drives for shut-off and control valves]. Armature construction. – 2004. - № 4 (30). – pp. 32-33.
4. Ovchinnikov I. E. Ventyilnie electrichiskie dvigateli i privod na ix osnove (malaya i srednaya mochnost) [Brushless electric motors and drive based on them (small and medium power)]. Lecture course. - St. Petersburg: CROWN-Vek, 2007. - 336 p.
5. Margulis B. G. Metodika opredeleniya osnovnix parametrov silovoy volnovoy peredachi s promegutochnimi telami kacheniya [The procedure for determining the main parameters of a power wave transmission with intermediate rolling elements]. Mechanical engineering. Bulletin of the Azov State University. -2008. Issue 18. – pp. 125-128.
6. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. Web. 10 March 2014 – Режим доступа: http://www.femm.info/wiki/OldVersions.
7. Chernyh I. V. Modelirovanie electromexanicheskyx ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electromechanical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink]. Moskow, DMK Press Publ., St. Petersburg. Piter Publ., 2008, 288 p.

Поступила (received) 19.01.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка і дослідження електромеханотронної системи малої потужності / В.В. Римша, І.М. Радимов, М.В. Гулий, І.П. Бабіч, О.А. Калініченко, С.А. Фокін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 26–32. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Разработка и исследование электромеханотронной системы малой мощности / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулый, И.П. Бабич, А.А. Калиниченко, С.А. Фокин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 26–32. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Development and investigation of the electromechanotronic system of low power / V.V. Rymsha, I.N. Radimov, M.V. Gulyy, I.P. Babich, A.A. Kalinichenko, S.A. Fokin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 26–32. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Римша Вітілій Вікторович, доктор технічних наук, професор, ТОВ «Електротехніка – Нові технології», заступник директора, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: office@ukrainemotors.com.ua.

Рымша Виталий Викторович, доктор технических наук, профессор, ООО «Электротехника – Новые технологии», заместитель директора, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: office@ukrainemotors.com.ua.

Rymsha Vitaly Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, «Electrotechnika - New technology» LTD, Deputy Director, tel. +38(048)738-58-55; e-mail: office@ukrainemotors.com.ua.

Радимов Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, ТОВ «Електротехніка – Нові технології», засновник, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: igor.radimov@gmail.com.

Радимов Игорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ООО «Электротехника – Новые технологии», учередитель, тел. +38(048)738-58-55; e-mail: igor.radimov@gmail.com.

Radimov Igor Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, associate professor, «Electrotechnika - New technology» LTD, founder, tel. +38(048)738-58-55; e-mail: igor.radimov@gmail.com.

Гулий Михайло Вікторович, кандидат технічних наук, ТОВ «Електротехніка – Нові технології», головний електронік , тел. (048)738-58-55, e-mail: ukrainemotors@ukr.net.

Гулый Михаил Викторович, кандидат технічних наук, ООО «Электротехника - Новые технологии», главный электроник, тел. (048)738-58-55, e-mail: ukrainemotors@ukr.net.

Gulyy Michail Victorovich, Candidate of Technical Sciences, "Electrotechnika - New technology" LTD, Chief electronics, tel. +38 (048) 738-58-55, e-mail: ukrainemotors@ukr.net.

Бабіч Ігор Петрович, ДП «КБ «Південне», Головний конструктор та начальник конструкторського бюро приводів та спеціальних систем , тел. (056)770-85-96, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Бабич Игорь Петрович, ГП «КБ «Южное», Главный конструктор и начальник конструкторского бюро приводов и специальных систем, тел. (056)770-85-96, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Babych Igor Petrovich, State Design Office "Yuzhnoye", Chief Designer-Head of actuators, instruments and mechanisms, tel. +38 (056) 770-85-96, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Калініченко Олександр Андрійович, ДП «КБ «Південне», начальник відділу гідравлічних та електромеханічних приводів, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Калиниченко Александр Андреевич, ГП «КБ «Южное», начальник отдела гидравлических и электромеханических приводов, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Kalinichenko Aleksandr Andreevich, State Design Office "Yuzhnoye", Head of department of the hydraulic and electromechanical drives, tel. +38 (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Фокін Сергій Анатолійович, ДП «КБ «Південне», начальник сектору, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Фокин Сергей Анатольевич, ГП «КБ «Южное», начальник сектора, тел. (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Fokin Sergey Anatolyevich, State Design Office "Yuzhnoye", Head of sector, tel. +38 (0562)38-47-86, e-mail: info@yuzhnoye.com.

УДК 621.313.333

Ю.М. ВАСЬКОВСЬКИЙ, О.А. ГЕРАСКІН

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ І ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В РОТОРІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ УШКОДЖЕННІ КОРОТКОЗАМКНЕНОЇ ОБМОТКИ РОТОРА

Методами математичного моделювання досліджено температурне поле і термомеханічні напруження в роторі асинхронного двигуна при ушкодженні короткозамкненої обмотки ротора. Показано, що при таких характерних ушкодженнях обмотки ротора як розриви стержнів ротора або сегментів короткозамикаючих кілець, виникає нерівномірний розподіл струмів і нагрів елементів обмотки, що призводить до появи в ній несиметричних термомеханічних напружень. Причина виникнення зазначених напружень полягає в різних величинах лінійного подовження окремих стержнів ротора внаслідок різного їх нагріву. Це прискорює подальшу руйнацію ушкодженої обмотки ротора і може призводити до швидкого виходу асинхронного двигуна з ладу.

Ключові слова: асинхронний двигун, короткозамкнена обмотка ротора, ушкодження обмотки, температура стержнів ротора, термомеханічні напруження.

Методами математического моделирования исследовано температурное поле и термомеханические напряжения в роторе асинхронного двигателя при повреждении короткозамкнутой обмотки ротора. Показано, что при таких характерных повреждениях обмотки ротора как разрывы стержней ротора или сегментов короткозамыкающих колец, возникает неравномерное распределение токов и нагрев элементов обмотки, что приводит к появлению в ней несимметричных термомеханических напряжений. Причина возникновения указанных напряжений заключается в разных величинах линейного удлинения отдельных стержней ротора вследствие различного их нагрева. Это ускоряет дальнейшее разрушение поврежденной обмотки ротора и может приводить к быстрому выходу асинхронного двигателя из строя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутая обмотка ротора, повреждение обмотки, температура стержней ротора, термомеханические напряжения.

Purpose. Uneven distributions of currents, heating and thermomechanical stresses in the construction elements of the short-circuit winding of the induction motor rotor are investigated at the characteristic damages of the winding - the breaks of the rods and short-circuiting rings of the rotor. **Methodology.** The article presents two mathematical models. Two-dimensional field mathematical model of the electromagnetic field of the induction motor with damaged rotor rods, which allows with sufficient accuracy to calculate the distribution of currents in the damaged rotor short-circuit coil in a steady state of operation. Two-dimensional field mathematical model of the electromagnetic field of an induction motor with damaged segments of short-circuiting rings. **Results.** With characteristic damage to the short-circuited winding of a rotor, powerful induction motors that appear due to prolonged operation and difficult operating conditions, there are factors that contribute to further accelerated rotor's destruction. **Originality.** Such factors are an increase in total heating and the appearance of an asymmetric temperature distribution between the individual rotor rods, causing the rotation of the rotor asymmetrical thermomechanical stresses to appear in the rotor windings. **Practical value.** The reason for these stresses is the different values of the linear extension of individual rotor rods due to their different heating. This accelerates the further destruction of the damaged winding of the rotor and can lead to quick induction motor failure. Researched results can be used in the induction motors design.

Keywords: induction motor, short-circuited rotor winding, damage of the winding, temperature of rotor bars, thermomechanical stresses.

Вступ. Одним з основних вузлів конструкцій короткозамкнутих асинхронних двигунів (АД) є короткозамкнена обмотка ротора (КЗОР). В процесі тривалої експлуатації, особливо потужних АД, виникають ушкодження елементів КЗОР – тріщини і розриви стержнів ротора (СР) та торцевих короткозамикаючих кілець (КЗК). Такі ушкодження при значних їх обсягах можуть призводити до аварійної зупинки АД з суттєвими економічними збитками. Тому дослідження причин і механізмів руйнації КЗОР з метою попередження аварійних ситуацій має важливе науково-практичне значення. Причини первинного ушкодження КЗОР зазвичай пов'язані з недоліками технологічного процесу виготовлення конкретного АД або з дефектами матеріалів. В елементах неушкодженої КЗОР розподіл індукованих струмів має симетричний характер, тобто діючі значення струмів в усіх СР і в усіх КЗК є однаковими, що обумовлює симетричний нагрів усіх елементів. При ушкодженні КЗОР симетричний розподіл струмів і температури порушується, що призводить до появи несиметричних термомеханічних напружень (НТМН), які викликають подальшу швидку руйнацію КЗОР. Механізм виникнення НТМН в ушкодженій КЗОР пояснюється різним лінійним розширенням окремих СР внаслідок несиметричного нагріву КЗОР. Особливо це проявляється в потужних АД, які мають достатньо велику довжину ротора. Наприклад, при різниці температур СР в 30°С і довжині ротора 0,85 м, різниця довжин мідних СР складає приблизно 0,5 мм, а механічні напруження в зварних з'єднаннях СР з КЗК дорівнюють величині 72−75 МПа, що наближується до межі міцності матеріалу СР. В неробочому стані АД довжини усіх СР є однаковими. З кожним робочим циклом АД НТМН поступово руйнують елементи КЗОР. Небезпечним є не тільки розрив СР, але й розрив сегмента КЗК. У такому випадку може виникнути руйнування КЗК на іншому торці ротора.

Прискорена руйнація ушкодженої КЗОР відбувається також за рахунок її збільшеного нагріву, викликаного зростанням еквівалентного активного опору КЗОР і, як наслідок, збільшенням робочого ковзання АД при умові незмінності навантаження на валу (електромагнітного моменту). При цьому відповідно зростають струми і нагрів обмотки статора.

Мета досліджень. Дослідження нерівномірного розподілу струмів, нагріву та термомеханічних напружень в елементах конструкції КЗОР АД при характерних ушкодженнях обмотки (розриви стержнів та короткозамикаючих кілець ротора).

Математичні моделі. 1. *Модель АД з розірваними СР.* Двовимірна польова математична

© Ю.М. Васьковский, О.А. Гераскін, 2018

модель електромагнітного поля АД з ушкодженими (розірваними) СР наведена в роботах [1, 2] і дозволяє з достатньою точністю розрахувати розподіл струмів в ушкодженій КЗОР в сталому режимі роботи. Рівняння електромагнітного поля відносно комплексної амплітуди єдиної осьової складової векторного магнітного потенціалу $\dot{A}_z$ в системі координат ротора має наступний вигляд:

$$\Delta\dot{A}_z - j\omega_1 s\mu\gamma\,\dot{A}_z = -\mu\,\dot{J}_{\text{стор}\,z}, \qquad (1)$$

де ω_1 – кутова частота обертання магнітного поля статора; s – ковзання ротора; μ – магнітна проникність; γ – електропровідність; $\dot{J}_{\text{стор}\,z}$ – густини сторонніх струмів – густини струмів в трьох фазах обмотки статора:

$$\begin{aligned}
\dot{J}_{A\,\text{стор}} &= I_m u_\Pi / S_\Pi,\\
\dot{J}_{B\,\text{стор}} &= I_m u_\Pi\left[\cos(-2\pi/3) - j\sin(-2\pi/3)\right]/S_\Pi,\\
\dot{J}_{C\,\text{стор}} &= I_m u_\Pi\left[\cos(-4\pi/3) - j\sin(-4\pi/3)\right]/S_\Pi,
\end{aligned} \qquad (2)$$

де I_m – амплітуда струму в фазі обмотки статора; u_Π – кількість послідовно з'єднаних провідників в пазу статора; S_Π – площа перерізу паза статора. Рівняння (1) доповнюється однорідними граничними умовами на зовнішній поверхні осердя статора. В моделі електропровідність неушкоджених СР дорівнює електропровідності матеріалу, з якого кого вони виготовлені, а електропровідність розірваних СР дорівнює нулю.

Після визначення об'ємної густини втрати потужності (Вт/м^3) $Q = J^2/\gamma$, вирішується задача розрахунку сталого теплового поля в АД, для чого розв'язується диференційне рівняння стаціонарної теплопровідності в двовимірній постановці [4]:

$$\lambda\Delta T = -Q, \qquad (3)$$

де $T(x,y)$ – невідома функція розподілу температури; λ – коефіцієнт теплопровідності. Граничними умовами для рівняння (3) є граничні умови третього роду:

$$\lambda\frac{\partial\theta}{\partial n} = \alpha(\theta - \theta_c), \qquad (4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі з охолоджуваних поверхонь; θ_c – температура охолоджуючого повітря (θ_c = 40°C). Ці умови задаються на зовнішній поверхнях ротора і статора, які межують з повітряним проміжком АД, на поверхнях аксіальних охолоджуючих каналів, виконаних під пазами ротора, і на поверхні ярма статора.

Збільшення лінійних розмірів (довжин) СР при їх нагріванні по відношенню до довжини найменш нагрітого стержня, розраховується за формулою:

$$\Delta L_k = \alpha_L \cdot L \cdot (T_k - T_{min}), k = \overline{1, N_2} \qquad (5)$$

де N_2 – кількість СР; α_L – коефіцієнт лінійного розширення (для міді α_L = 16,7·10^{-6} °C^{-1}, для алюмінію α_L = 23,8·10^{-6} °C^{-1}); T_k – температура k-го СР; $T_{\min}$ – мінімальна температура (температура найменш нагрітого СР), який має довжину L. Якщо ввести відносне збільшення довжини $\varepsilon_k = \Delta L_k / L$, то термомеханічні напруження, які виникають в СР внаслідок його нагріву, можна виразити згідно з законом Гука за формулою:

$$\sigma_k = E\varepsilon_k, \qquad (6)$$

де E – модуль Юнга (для міді E = 123· 10^9 Па).

Модель чисельно розв'язуються методом скінченних елементів в програмі COMSOL Multiphysics.

2. *Модель АД з розірваними сегментами КЗК.* В рамках двовимірної польової математичної моделі розрив сегментів КЗК не може бути змодельований безпосередньо, оскільки КЗК розташовані на торцях ротора за межами площини поперечного перерізу АД. Для моделювання АД з зазначеним ушкодженням застосовується коло-польова модель, в якій використовується електрична схема заміщення КЗОР [3]. Фрагмент схеми зображено на рис. 1. В цій схемі задаються: електричні параметри СР і сегментів КЗК (з огляду на малу частоту струмів ротора задаються лише активні опори) та ЕРС, індуковані в СР. Опір розірваного сегменту (або декількох сегментів) приймається нескінченно великим і далі знаходиться розподіл струмів в КЗОР при наявності відповідного ушкодження (розв'язок відбувається в програмі Multisim). Надалі отриманий розподіл струмів задається як відомі сторонні струми в рівнянні (1) і вирішується польова задача.

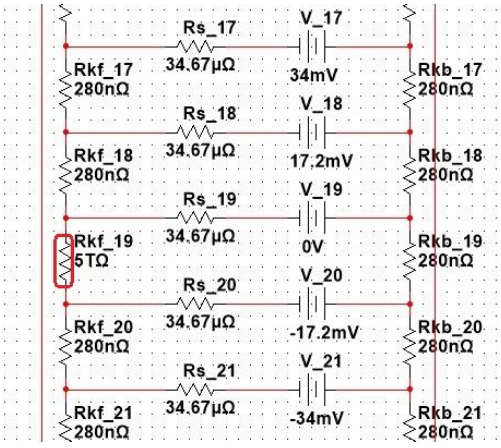


Рис. 1 – Фрагмент електричного кола КЗОР в програмі Multisim

Результати моделювання. Дослідження проводилися на прикладі АД типу АТД, що працює в номінальному режимі і параметри якого такі: номінальна потужність 2500 кВт, коефіцієнт потужності 0,905, ККД 0,964, частота обертання 2980 об/хв, номінальна напруга статора 6 кВ, номінальний струм статора 280 А, діаметр статора 1115 мм, повітряний проміжок 5 мм, кількість пазів статора 48, схема з'єднання фаз обмотки статора – трикутник, діаметр розточки ротора 590 мм, кількість стержнів ротора 38, довжина СР 0,85 м, клас нагрівостійкості ізоляції обмотки статора В, коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь статора і ротора в охолоджуюче повітря α

= 30 Вт/(м^2·К). Інші теплофізичні дані задавалися згідно з довідковими даними відповідних матеріалів. Під кожним пазом ротора розташовані аксіальні вентиляційні канали.

Дослідження виконувались для різних варіантів ушкоджень КЗОР, так, наприклад, кількість розірваних і поряд розташованих стержнів або сегментів КЗК варіювалася від 1 до 5.

При ушкодженні КЗОР і збільшенні її активного опору спочатку струми в стержнях ротора зменшуються, що зменшує обертовий електромагнітний момент АД. Але оскільки гальмівний момент залишається незмінним, то починається гальмування ротора і збільшення робочого ковзання, що супроводжується зростанням струмів статора і ротора і відповідним зростанням електромагнітного моменту для урівноваження незмінного гальмівного моменту навантаження.

Урахування збільшення тепловиділення в роторі і статорі АД внаслідок збільшення струмів статора і ротора можна охарактеризувати коефіцієнтом $k_{СКЗ_I}$, який розраховується як середньоквадратичне значення усіх струмів в СР. Це обумовлено тим, що струми ротора обертаються відносно ротора з частотою ковзання і рівномірно (усереднено, або середньоквадратично) прогрівають ротор уцілому. Наприклад, в таблиці 1 показано величини коефіцієнта збільшення струмів ротора для різної кількості ушкоджених поряд розташованих сегментів КЗК.

Таблиця 1 – Коефіцієнт збільшення струмів ротора при зміні кількості ушкоджених поряд розташованих сегментів КЗК

Параметр	Кількість поряд розташованих ушкоджених сегментів КЗК					
	0	1	2	3	4	5
$k_{СКЗ_I}$	1,00	1,15	1,18	1,25	1,27	1,31

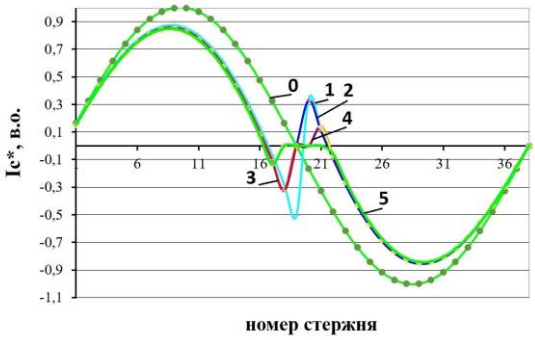


Рис. 2 – Розподіл струмів в СР при ушкодженнях сегментів КЗК в залежності від кількості ушкоджених сегментів

На рис. 2 показано розподіл струмів в СР при ушкодженнях сегментів КЗК в залежності від кількості ушкоджених СКК: графік *1* – ушкоджено 1 сегмент, який знаходиться на одній стороні ротора між стержнями ротора з номерами 19 і 20 (рис. 1), графік *2* – ушкоджено 2 сегменти між стержнями 19 і 21, графік *5* – ушкоджено 5 сегментів між стержнями 17 і 22. Показаний на рис. 2 розподіл струмів розраховно при умові незмінності ковзання ротора, що дозволяє оцінити вплив відповідних ушкоджень КЗОР на величину струмів ротора.

На першому етапі було досліджено температурне поле неушкодженого АД. Встановлено, що обмотка статора нагрівається більше за ротор, зокрема максимальна температура статора складає 103,8°С, а ротор нагрівається до 77,5°С. Виявлено нерівномірність розподілу температури обмотки статора уздовж висоти паза статора, яка становить приблизно 5°С.

В неушкодженому АД струми в стержнях ротора розподілені синусоїдально і зміщуються з частотою ковзання (3−5 Гц), в результаті чого вся обмотка ротора нагріта рівномірно.

Дослідження температурного поля при ушкодженні стержнів КЗОР АД. За результатами дослідження температурного поля АД при зміні кількості поряд розташованих розірваних стержнів КЗОР було виявлено таке.

На рис. 3 представлено картину розподілу температури в роторі АД при розриві 5-ти поруч розташованих СР. На рис. 4 показано залежності температури по стержнях ротора для різної кількості розірваних СР. З рис. 3, 4 чітко видно нерівномірний розподіл температури уздовж поверхні ротора.

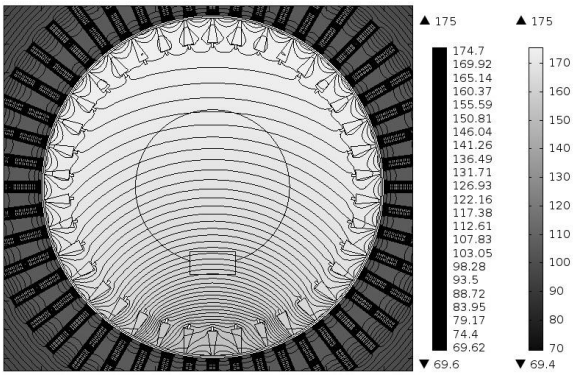


Рис. 3 – Розподіл температури в роторі АД при 5 ушкоджених стержнях КЗОР АД

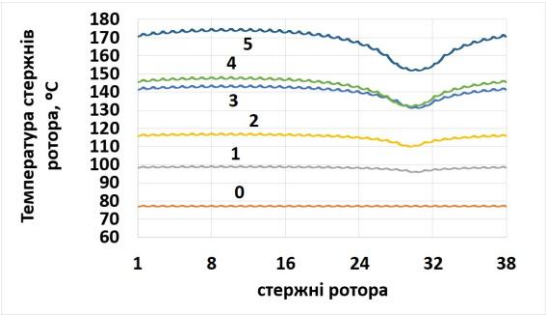


Рис. 4 – Температура в стержнях ротора в залежності від кількості ушкоджених стержнів КЗОР АД

Загальний нагрів ушкодженого ротора у порівнянні з неушкодженим зростає в 1,33−2,27 разів в залежності від обсягів ушкодження, що є важливою причиною подальшого швидкого руйнування КЗОР. При цьому, якщо при розриві одного стержня максимальна різниця температури різних СР складає 6°С, то при ушкоджені 5-ти стержнів ротора АД різниця температури різних стержнів ротора становить 23°С. При

цьому різниця величин довжин окремих СР КЗОР внаслідок їх теплового розширення становить: $\Delta L = 16{,}7 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1} \cdot 0{,}85 \cdot 23\,°C = 0{,}33$ мм.

Дослідження температурного поля при ушкодженні сегментів КЗК АД. За результатами дослідження температурного поля АД при зміні кількості поряд розташованих ушкоджених сегментів КЗК КЗОР було виявлено таке.

При обриві одного сегменту КЗК стержні ротора, що розташовані поруч з цим сегментом, не тільки не виключаються з електричного кола ротора, але й по ним будуть протікати більші струми. Це пояснюється тим, що струми ротора оминають ушкоджений сегмент КЗК, внаслідок чого збільшуються струми в СР, найближчих до ушкодженого сегменту (рис. 2).

При обриві двох і більше поруч розташованих сегментів КЗК виникає інша ситуація: СР, які розташовані між цими сегментами, виключаються з електричного кола ротора і струм по ним не протікає, а по суміжним стержням протікають більші струми.

На рис. 5 представлено картину розподілу температури в роторі АД при розриві 5-ти поруч розташованих сегментів КЗК, а на рис. 6 показано залежності температури по стержнях ротора для різної кількості розірваних сегментів КЗК. З рис. 5, 6 також чітко видно нерівномірний розподіл температури уздовж поверхні ротора.

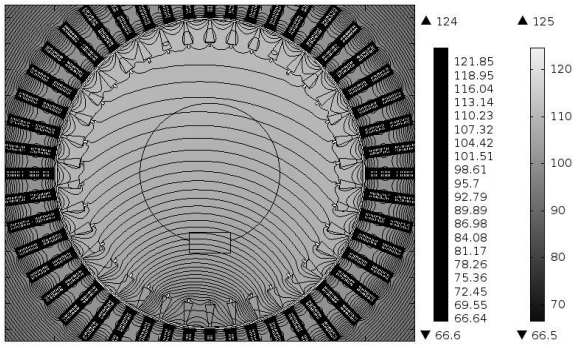


Рис. 5 – Температура в роторі АД
при 5-ти ушкоджених сегментів КЗК

Загальний нагрів ротора також суттєво зростає – в 1,24−1,57 разів в залежності від обсягів ушкодження, але є меншим, ніж при розриві СР.

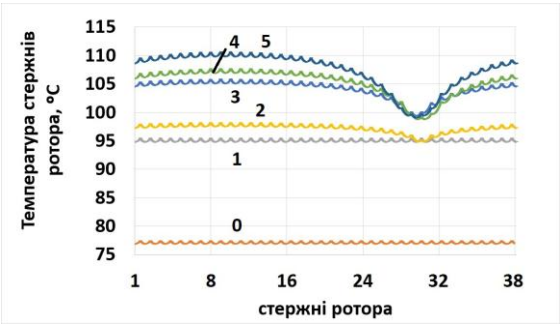


Рис. 6 – Температура в стержнях ротора в залежності від кількості ушкоджених сегментів КЗК

При ушкоджені 5-ти сегментів КЗК різниця між нагрівом різних стержнів ротора становить 12°С. Різниця величин термомеханічного подовження довжин СР АД становить:

$\Delta L = 16{,}7 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1} \cdot 0{,}85$ м $\cdot 12\,°C = 0{,}17$ мм.

Несиметричні термомеханічні напруження при ушкодженні КЗОР АД.

Найбільші НТМН в КЗОР будуть виникати тоді, коли один або декілька СР внаслідок їх розривів або розривів декількох сегментів КЗК не обтікаються струмами ротора. Наприклад, один стержень є вимкненим через ушкодження КЗК, а суміжний стержень є перегрітим. Тоді різниця температурного подовження довжин зазначених СР буде найбільшою. Оцінки, проведені на прикладі потужного АД, показують, що в реальних умовах така різниця може сягати величини 0,4−0,5 мм. При цьому виникаючі НТМН складають 55−65 МПа і діють перш за все на зварні з'єднання між СР і КЗК. Якщо ушкоджуються КЗК на одній стороні ротора, то це може призвести до ушкодження КЗК на іншій стороні ротора.

Висновки.

1. При характерних ушкодженнях короткозамкненої обмотки ротора потужних АД, які з'являються внаслідок тривалої роботи та важких умов експлуатації (розриви стержнів ротора і сегментів короткозамикаючих кілець), виникають фактори, які сприяють подальшій прискореній руйнації ротора. Такими факторами є збільшення загального нагріву і поява несиметричного розподілу температури між окремими стержнями ротора, що викликає появу в обмотці ротора несиметричних термомеханічних напружень.

2. Більш небезпечним ушкодженням є розриви стержнів ротора: в залежності від обсягів ушкодження температура ротора зростає в 1,33−2,27 разів, а перепад температури між окремими стержнями сягає 30°С. Розрив сегментів КЗК також є небезпечним видом ушкодження, при якому нагрів ротора збільшується в 1,24−1,57 разів в залежності від обсягів ушкодження.

3. Різний нагрів СР призводить до виникнення термомеханічних напружень в КЗОР 55−65 МПа.

Список літератури

1. *Васьковський Ю.М.,* Вплив ушкоджень короткозамкненого ротора асинхронного двигуна на електромагнітний момент / Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін, // Вісник Кременчуцького нац. ун-ту імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 4/2014(87). – С. 20-24.
2. *Васьковський Ю.М.* Діагностика кутового ексцентриситету ротора асинхронних двигунів на основі аналізу віброзбуджуючих сил / Васьковський Ю.М., Гераскін О.А., Беленок Н.В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 11(1183). – С. 30-35.
3. *Васьковский Ю. Н.* Анализ вибровозмущающих сил в асинхронных двигателях при обрыве сегментов короткозамыкающих колец обмотки ротора на основе цепе-полевой математической модели / Ю. Н. Васьковский, А. А. Гераскин, М. А. Коваленко // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 18-22.
4. *Филипов И.Ф.* Теплообмен в электрических машинах. Добавочные потери в турбогенераторах –Л.: Энергоатомиздат Л.О., 1986. – 256 с.

References (transliterated)

1. Vaskovskiy Yu.M., *Vpliv ushkodzhen korotko-zamknenogo rotora asinhronnogo dviguna na elektromagnitniy moment* [Influence of damages of short-circuited rotor of induction motor on electromagnetic moment] / Yu. M. Vaskovskiy, O. A. Geraskin, // Visnik Kremenchutskogo nats. un-tu imeni Mihayla Ostrogradskogo. – Kremenchuk: KrNU, 2014. – Vip. 4/2014(87). – C. 20-24.
2. Vaskovskiy Yu.M. *Diagnostika kutovogo ekstse-ntrisitetu rotora asinhronnih dviguniv na osnovi analizu vibrozbudzhuyuchih sil* [Diagnostics of the angular eccentricity of induction motors rotor on the basis of the analysis of vibro-perturbing forces] / Vaskovskiy Yu.M., Geraskin O.A., Belenok N.V. // Visnik Natsionalnogo tehnichnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prats. Seriya: Elektrichni mashini ta elektromehanichne peretvorennya energiyi. – Harkiv : NTU «HPI». – 2016. – № 11(1183). – S. 30-35.
3. Vaskovskiy Yu. N. *Analiz vibrovozmuschayuschih sil v asinhronnyih dvigatelyah pri obryive segmentov korotkozamyikayuschih kolets obmotki rotora na osnove tsepe-polevoy matematicheskoy modeli* [Analysis of vibro-perturbing forces in induction motors in case of breakage of short-circuiting rotors winding rings segments based on a chain-field mathematical model] / Yu. N. Vaskovskiy, A. A. Geraskin, M. A. Kovalenko // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – № 5. – C. 18-22.
4. Filipov I.F. *Teploobmen v elektricheskih mashinah. Dobavochnyie poteri v turbogeneratorah* [Heat exchange in electric machines. Additional losses in turbogenerators] –L.: Energoatomizdat L.O., 1986. – 256 s.

Надіслано (received) 08.02.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження температурного поля і термомеханічних напружень в роторі асинхронного двигуна при ушкодженні короткозамкненої обмотки ротора / Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 33–37. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2409-9295.

Исследование температурного поля и термомеханических напряжений в роторе асинхронного двигателя при повреждении короткозамкнутой обмотки ротора / Ю. Н. Васьковский, А. А. Гераскин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 33–37. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2409-9295.

Investigation of the temperature field and thermomechanical stresses in induction motor rotor in case of damage of rotor short-circuited winding / Y. N. Vaskovskiy, A. A. Geraskin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 33–37. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / About the Authors

Васьковський Юрій Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; тел.: (050) 10-220-10; e-mail: vun157@gmail.com.

Васьковский Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», профессор кафедры электромеханики; тел.: (050) 10-220-10; e-mail: vun157@gmail.com.

Vaskovskiy Yuriy Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiyv Polytechnic Institute", tel.: (050) 10-220-10; e-mail: vun157@gmail.com.

Гераскін Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; тел.: (099) 364-75-94; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.

Гераскин Александр Анатольевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», доцент кафедры электромеханики***;*** тел.: (099) 364-75-94; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.

Geraskin Alexandr Anatolievich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor at the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiyv Polytechnic Institute", tel.: (099) 364-75-94; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.

УДК 621.313.333.322-82(085)

К. О. КОБЗАР, О. В. ТРЕТЯК, О. Ю. ШУТЬ, В. Р. ПОЛІЄНКО, П. Г. ГАКАЛ, Є. С. П'ЯТНИЦЬКА

РОЗРОБЛЕННЯ Й ВПРОВАДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ТА ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ ТЕС, АЕС, ГЕС, ГАЕС

Вперше в Україні (не має аналогів) на світовому рівні з використанням розробленої методики проведено розрахункові дослідження з проектування й моделювання потужних турбо- та гідрогенераторів. Це дозволило створити енергетичні установки нового покоління з показниками ефективності та надійності, які відповідають світовим вимогам, що пред'являються до енергетичного устаткування. Побудовано турбогенератор ТГВ-550-2МУ3 та розроблено технічні умови для його впровадження на Екібастузській ДРЕС. Спроектовано та розроблено гідрогенератор-двигун СВО2-1255/255-40 УХЛ4 з метою впровадження на Дністровській ГАЕС.

Ключові слова: турбогенератор, бандажне кільце ротору, торсійний вал, втомне руйнування, складнонапружений стан, моделювання, субмікро- і мікротріщина, міцність

Впервые в Украине (не имеет аналогов) на мировом уровне с использованием разработанной методики проведены расчетные исследования по проектированию и моделированию мощных турбо- и гидрогенераторов. Это позволило создать энергетические установки нового поколения с показателями эффективности и надежности, которые соответствуют мировым требованиям, которые предъявляются к энергетическому оборудованию. Построено турбогенератор ТГВ-550-2МУ3 и разработаны технические условия для его внедрения на Экибастузской ГРЭС. Спроектировано и разработано гидрогенератор-двигатель СВО2-1255 / 255-40 УХЛ4 с целью внедрения на Днестровской ГАЭС.

Ключевые слова: турбогенератор, бандажное кольцо ротора, торсионный вал, усталостное разрушение, сложнонапряженное состояние, моделирование, субмикро- и микротрещина, прочность.

For the first time in Ukraine (there is no analogues) at the world level, using the designed methods, calculation researches were carried out on designing and simulation of high power Turbogenerators and Hydrogenerators. This let design power plants of a new generation with indices of efficiency and reliability that meet the world requirements that are submitted to the power equipment.

Turbogenerator TGV-550-2MU3 (rated 550 MW) was manufactured and technical specifications for its put in to operation at Ekibastuzskaia SDPP were designed. In accordance with the requirements of GOST 533-2000 for Turbogenerators rated over 350 MW mean time between failures comprises 18000 h., that corresponds to complete specified service life of 40 years. Given condition in the complete scope is provided for Turbogenerator TGV-550-2MU3, the stand tests were carried out successfully.

Hydrogenerator-Motor SVO2-1255 / 255-40 UHL4 (power in the generator mode is of 324 MW, power of the motor is of 416 MW) was designed with the purpose of put in to practice at Dniestrovskaya HPSP. Taking in to consideration the neccesity of trouble-free operation of the hydroaggregate during long term at provision of peak loads of the electric power net for all the parts the calculations of complex stressed state which let develop the design corresponding to the best world standards were carried out.

Designed Turbogenerators and Hydrogenerators give possibility to expand the export opportunities of the power enterprises of our state, which makes a significant contribution in to the economic development of the country.

Keywords: Turbogenerator, the retaining ring of the rotor, the torsion shaft, fatigue distorsion, complex stressed state, simulation, submicro- and micro crack, strength.

Вступ. Однією з найважливіших складових добробуту громадян є повне, надійне та екологічно безпечне забезпечення потреб суспільства теплом, електроенергією та іншими енергетичними продуктами. Значна частина споживання паливно-енергетичних ресурсів припадає на теплові електричні станції (ТЕС) та теплоелектроцентралі (ТЕЦ), що виробляють електричну та теплову енергії.

Проведений аналіз технічного стану турбогенераторного обладнання України показує, що більшість турбогенераторів ТЕС відпрацювали свій термін служби. Конструкції турбо- та гідрогенераторів є застарілими, а технічний стан вже не відповідає сучасним вимогам з ефективності, надійності та маневреності. Наразі, внаслідок гострої необхідності приведення показників обладнання до Європейських норм, у зв'язку з майбутньою інтеграцією об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України до Європейської енергетичної системи (ЄЕС), є велика потреба в модернізації існуючих та створенні нових високоекономічних турбогенераторів.

Через вищезазначену причину створення нових високоефективних типів турбо- та гідрогенераторів, впровадження комплексу заходів з модернізації діючого обладнання, направлених на доведення показників турбогенераторів до сучасних вимог, водночас зі збільшенням їх потужності та перевантажувальної здатності, є надзвичайно сучасними і важливими задачами.

Відповідно до енергетичної програми України на період до 2030 року споживання електроенергії в Україні повинно досягти 395,1 млрд. кВт·годин при її виробництві усіма видами електричних станцій – 420,1 млрд. кВт·годин (базовий сценарій). При цьому теплові електростанції мають виробляти 180,4 млрд. кВт·годин електроенергії, що потребує встановлення генеруючих потужностей 46,4 млн. кВт, або 52,43 % від загальної потужності електростанцій, яка сягає 88,5 млн. кВт.

Таким чином, для забезпечення економіки України електричними потужностями у запланованому обсязі до 2030 року необхідно не тільки провести оновлення нині діючих великих ТЕС, ТЕЦ ГЕС, але й додатково побудувати електростанції загальною встановленою потужністю генеруючого обладнання не меншою 17,8 млн. кВт, тобто для нових електростанцій необхідно виготовити обладнання приблизно для 60-ти енергоблоків потужністю по 300 МВт. Для забезпечення сучасних вимог з надійності та маневреності, стійкого і ефективного функціонування ОЕС України, беручи до уваги умови з інтеграції енергосистеми України до ЄЕС та забезпечення вимог UCTE, необхідно також проведення науково-дослідних та проектних робіт.

© К.О. Кобзар, О.В. Третяк, О.Ю. Шуть, В.Р. Полієнко, П.Г. Гакал, Є.С. П'ятницька , 2018

Крім того, треба зважати на обставини, що 46 % електроенергії в Україні виробляється на АЕС, які повинні працювати в базовому режимі, а потужностей ГЕС та ГАЕС, що працюють в регулюючому режимі, недостатньо (9 % від встановлених потужностей всіх електростанцій України). Тому в сучасній ситуації не тільки газомазутні блоки, але й вугільні повинні брати участь у регулюванні частоти та потужності ОЕС України, що істотно впливає на ресурс теплових енергоблоків й може призвести до виходу їх з ладу раніше запланованого терміну.

Понад 80 % потужностей ТЕС України укомплектовано турбогенераторами виробництва харківського ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», і на переважній більшості енергоблоків експлуатуються турбогенератори потужністю 200–300 МВт. Також підприємство має великий досвід проектування та виробництва гідрогенераторів великої та малої потужності, саме тому ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ» слідкує за новітніми тенденціями розвитку турбо- та гідрогенераторобудування й разом з науково-дослідними організаціями України проводить наукові дослідження з метою розроблення і впровадження інноваційних технологій у виробництво для підвищення конкурентоздатності своєї продукції на світовому ринку.

Зважаючи на об'єктивні причини турбогенератори ТЕС ще довгий час будуть використовуватись для покриття пікових і напівпікових навантажень, забезпечуючи базовий режим роботи АЕС. Ця обставина потребує нового підходу до проблеми модернізації діючих турбогенераторів та проектування їх удосконалених зразків, що, в свою чергу, ставить задачу поглиблення досліджень в області моделювання електричних машин, термодинамічних процесів, розрахунку магнітних і температурних полів.

Важливим питанням при експорті електроенергії до європейських країн є розв'язання проблеми високої стійкості турбогенераторів при роботі на довгі лінії електропередач, забезпечуючи режими глибокого споживання реактивної потужності. Для цього необхідно продовжувати роботи з дослідження процесів у скінченних частинах турбогенераторів та розробці заходів з підвищення надійності елементів конструкції при проектуванні та модернізації турбогенераторів шляхом впровадження власно розроблених інноваційних технологій.

Колективом авторів розроблено методику та проведено розрахункові дослідження теплового стану потужних турбо- та гідрогенераторів за допомогою ліцензованого програмного комплексу SolidWorks Simulation, що дозволило створити потужні генератори нового покоління з підвищеними показниками надійності, довговічності та ремонтопридатності. Це забезпечує високу економічність, надійність та маневреність електрогенеруючого устаткування, дає можливість розв'язувати проблему оновлювання турбогенераторного парку України та розширює експортні можливості енергопідприємств нашої держави, що дозволить зробити суттєвий внесок у економічний розвиток країни.

Розв'язанню зазначених задач присвячено дану роботу. Тут наведені підсумки низки науково-технічних досліджень, конструкторських, технологічних рішень та результати практичного впровадження нових зразків турбогенераторів й заходи з їх модернізації на діючих енергогенеруючих підприємствах.

Причини виникнення аварійних ситуацій турбо- та гідрогенераторів. Робота турбо- та гідрогенераторів пов'язана з виникненням складнонапруженого стану їх вузлів і деталей, але ступінь дії різного роду комбінованих навантажень відрізняється для кожного елемента генератора. Це ускладнює проведення розрахунків у комплексі. З метою виявлення найбільш уразливих частин електрогенеруючої машини проведено детальний аналіз пошкоджень, що виникають у генераторах при довгостроковій експлуатації.

За результатами проведеної статистичної обробки даних про виникнення типових аварійних ситуацій, які спостерігаються на електричних генераторах електростанцій, обумовлених відмовами різного роду, побудовано діаграми (рис. 1).

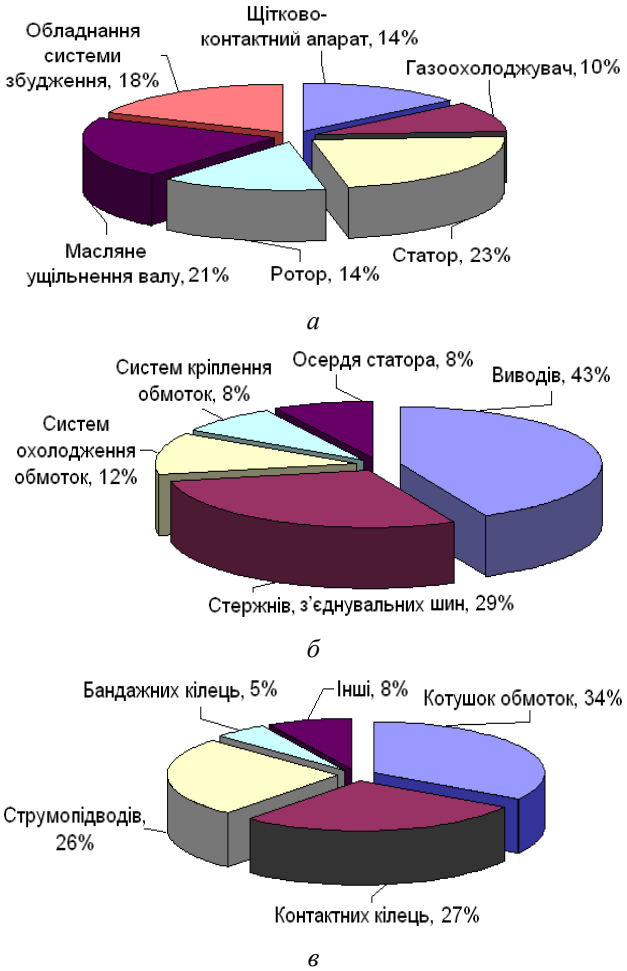


Рис. 1 – Діаграми даних про виникнення типових аварійних ситуацій електрогенераторів: *а* – загальна картина пошкоджень; *б, в* – пошкодження статора та ротора відповідно

З рис. 1 видно, що найбільш уразливими частинами є статор, ротор, контактні кільця та струмовідводи. Слід відзначити, що також треба приділити увагу системі охолодження тому, пов'язану з технікою безпеки через наявність водню як охолоджуючого середовища генератора.

Серйозні пошкодження ізоляції лобових частин спостерігаються в результаті дії електродинамічних сил. При цьому лобові частини прагнуть наблизитися до натискних фланців статора та зміститися згідно з обертанням поля ротора. Виникнення коронної активності призводить до замикання листів активної сталі турбогенератора та виходу із ладу всієї машини. Також характерним пошкодженням електричної ізоляції є розтріскування. Через те, що цей дефект призводить до виникнення короткого замикання та можливої пожежі, західні фірми приділяють багато уваги проблемам експлуатації стрижнів.

На сучасному етапі розвитку комп'ютерної техніки та програмних комплексів для моделювання аеро- та газодинамічних процесів й оцінки складнонапруженого стану конструктивних елементів об'єкта, що розглядається, проведено комплексні розрахункові дослідження турбо- та гідрогенераторів з урахуванням їх особливостей. Як приклад наведено принципи моделювання основних елементів генераторів.

Визначення теплового стану роторів турбо- та **гідрогенераторів.** Ротор являє собою особливо навантажений вузол турбогенератора. Найбільш відповідальним елементом ротора є обмотка. За результатами аналізу теплового стану обмотки визначається ресурс ротора турбо- та гідрогенератора в цілому.

Сучасні уявлення про надійність конструкцій показують, що з чотирьох причин (втома, повзучість, корозія під напругою і крихкість) найбільш відповідальною за руйнування є крихкість, оскільки з нею пов'язана раптовість завершення руйнування та найважчі наслідки.

Інші три причини сприяють поширенню зародкового дефекту, тобто визначають час прояву крихкості. Тому визначати руйнування в межах явища втоми, корозії під напругою або повзучості під напругою є менш значущим фактором, ніж навчитися вимірювати й порівнювати відносний опір руху тріщин у названих випадках з використанням критеріїв механіки руйнування.

Як правило, тріщини починають розвиватися задовго до повного руйнування, вони виникають і поширюються навіть до вичерпання своєю конструкцією несучої здатності. Тому знання законів поширення тріщин та їх використання дозволяє судити про несучу здатність деталей.

Досягнення в дослідженні руйнування дозволяють зробити такі висновки:

– руйнування в загальному випадку є не критичною подією, а фізичним процесом зародження, об'єднання й зростання тріщин. Цей процес закінчується втратою стійкості однією з таких тріщин;

– субмікро- і мікротріщини – звичайний елемент дефектної структури, подібний до дислокацій та вакансій, а не наслідок недостатньо ефективної технології виготовлення матеріалу.

Для визначення теплового стану ротора з урахуванням просторового тепловиділення та різних умов тепловіддачі на різних ділянках обмотки розв'язано такі задачі:

– створено математичну модель тривимірного теплового стану обмотки ротора;

– оцінюється тепловиділення в обмотці на різних режимах роботи турбогенератора;

– визначаються умови тепловідведення на різних ділянках обмотки.

Для реалізації поставленої задачі використовується пакет SolidWorks, в якому реалізовано метод скінченних елементів. Тепловий стан вузла визначається в два етапи. На першому етапі проводиться розрахунок течії охолоджуючого середовища методом скінченних обсягів. Рух і теплообмін плинного середовища моделюються за допомогою рівнянь Нав'є – Стокса, що описують закони збереження маси, імпульсу та енергії цього середовища. Системи диференціальних рівнянь доповнюються початковими і граничними умовами (III роду), що встановлюють розподіл коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні ротора та його елементів.

Безпосереднє визначення теплового стану тіла ротора (2-й етап) здійснюється методом скінченних елементів. Граничними умовами для даного розрахунку є коефіцієнти тепловіддачі, які визначені на попередньому етапі. Розв'язання рівняння Пуассона, що описує теплопередачу в роторі, проводиться методом скінченних елементів.

Визначення теплового стану «Міжполюсних перемичок». Для виконання точного розрахунку механічного напруження у конструкції «Міжполюсних перемичок» розроблено модель, яка враховує температурні навантаження, зміну частоти обертання в часі (рис. 2) та зміну характеру охолодження вузла при різних частотах обертання.

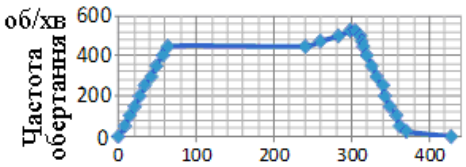


Рис. 2 – Графік залежності частоти обертання від часу

Для аналізу міцності вузла на всіх режимах його роботи з урахуванням теплового стану також використовується метод скінченних елементів, реалізований в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

Як приклад розглянемо можливість використання методики, що пропонується для розрахунку турбогенератора ТГВ-550-2МУ3 та вертикального оборотного гідрогенератора-двигуна СВО2-1255/255-40 УХЛ4.

Турбогенератор ТГВ-550-2МУ3. Здійснивши детальний теоретичний пошук властивостей вітчизняних роторів та їх світових аналогів, було

проведено розрахунки складнонапруженого стану ротора турбогенератора ТГВ-550-2МУ3.

Бандажне кільце ротора є самим навантаженим елементом конструкції за умовами експлуатації, навантаження в окремих точках у критичних режимах якого можуть сягати межі текучості (рис. 3), призводить до повного виходу з ладу всієї машини.

Максимальне напруження становить 687 МПа, при цьому коефіцієнт запасу k = 686 / 687 = 1,0.

Для забезпечення надійності конструкції проведена оцінка складнонапруженого стану короба турбогенератора потужністю 550 МВт, який відповідає кращим світовим стандартам. Слід зазначити, що вперше було проведено оптимізацію системи охолодження, що потребувала зміни тиску зі звичних 3 до 5 атм.

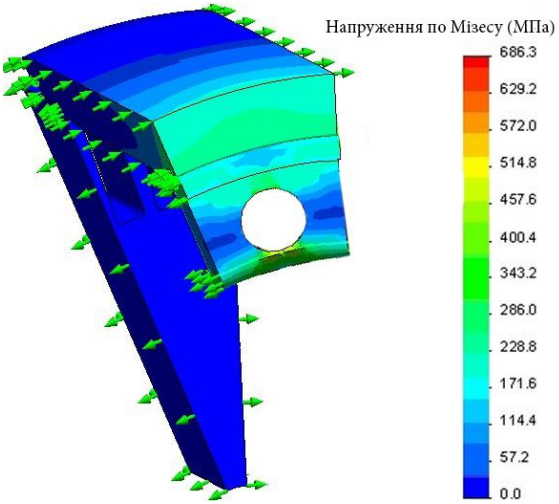


Рис. 3 – Складнонапружений стан бандажного кільця ротора

На рис. 4 подано головний зразок турбогенератора на стенді заводу. Короби, де розташовані лобові частини стрижнів, виводи та конструктивні елементи системи охолодження в процесі експлуатації кріпляться диференційними шпильками-пружинами та витримують навантаження понад 100 т, що викликано надмірним тиском в корпусі статора.

Рис. 4 – Випробувальний стенд турбогенератора на стенді заводу ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ»

Детальний аналіз отриманих результатів дозволив розробити конструкцію короба та підшипникових вузлів приставного типу. Серед отриманих результатів слід зазначити, що така конструкція дає можливість у найкоротший термін проводити ремонтні роботи із заміни активних елементів, без розбирання всього корпусу машини. Великі переміщення в окремих точках не визивають пошкоджень (рис. 5 і 6).

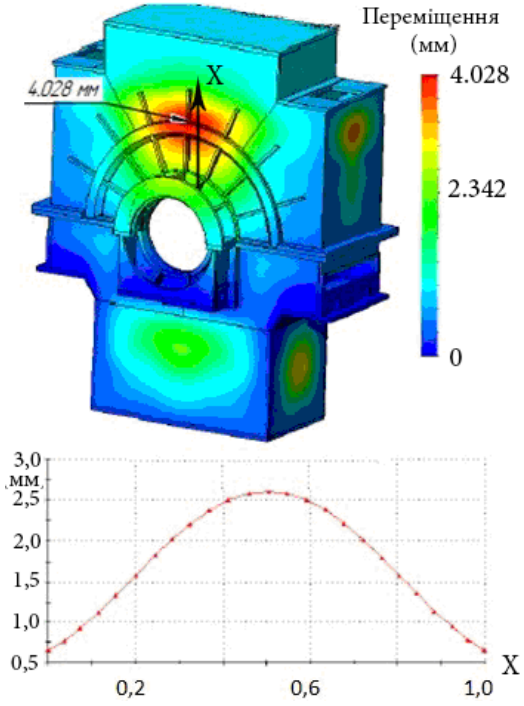


Рис. 5 – Епюра переміщень

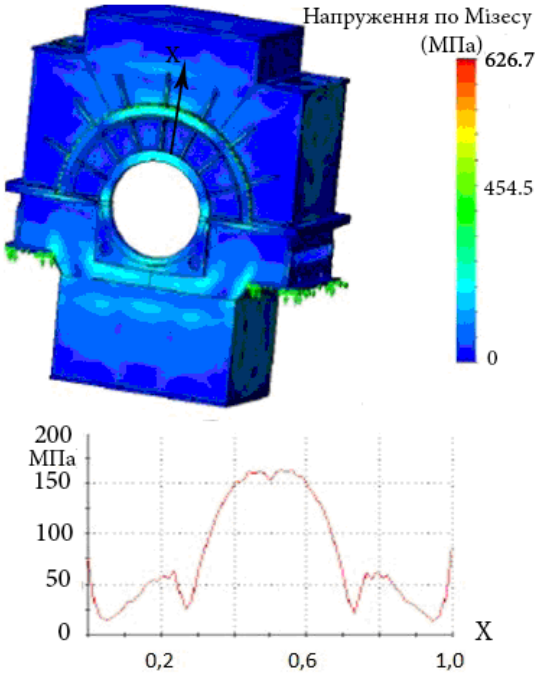


Рис. 6 – Епюра напруженого стану

Згідно з вимогами ГОСТ 533-2000 для турбогенераторів потужністю понад 350 МВт напрацювання на відмову складає 18000 год, що відповідає повному призначеному терміну служби 40 років. При розрахунку методом скінченних елементів термін служби обмотки при роботі в полі відцентрових сил (n = 3000 об/хв) склав 18000 циклів. Таким чином, низький рівень напруги в обмотці дозволить забезпечити нормований ресурс генератора. Згідно з розрахунковими результатами отримано конструктивні параметри турбогенератора ТГВ-550-2МУ3 (табл. 1), який є самим потужним із тих, що виготовляються енергобудівними підприємствами України.

Таблиця 1 – Масові характеристики гідрогенератора-двигуна СВО2-1255/255-40 УХЛ4

Найменування вузла	Маса, кг
Статор	540000
Ротор	780000
Хрестовина	93400
Ванна масляна з підп'ятником та диском у складеному стані	95400
Перекриття шахти насос-турбіни	34200
Установка повітроохолоджувачів	28350
Підставка	2800

Розроблений турбогенератор повинен допускати роботу при максимальному тривалому навантаженні 600 МВт з cos φ = 0,92 при надмірному тиску водню 0,45 МПа і температурі технічної циркуляційної води, що надходить в теплообмінники замкнутого контуру водопостачання газоохолоджувачів і в теплообмінники охолодження дистиляту, не більше 25°С.

Турбогенератор має допускати тривалу роботу при зниженому тиску водню з відповідним зниженням номінальної потужності. Допустима величина потужності при надмірному тиску 0,35 МПа повинна становити близько 85 %, при 0,3 МПа – близько 80 %, при 0,25 МПа – близько 72,5 %, при 0,2 МПа – близько 65% від номінальної і уточнюється за результатами випробувань.

Вертикальний оборотний гідрогенератор-двигун СВО2-1255/255-40 УХЛ4. Для вертикального оборотного гідрогенератора-двигуна проводяться розрахунки теплового стану та на міцність аналогічно турбогенератору. Авторським колективом проведено розрахункові дослідження з моделювання та проектування Внаслідок виконання роботи розроблено вертикальний оборотний гідрогенератор-двигун СВО2-1255/255-40 УХЛ4, який є найпотужним у Європі та відповідає сучасним світовим вимогам, що ставляться до електрогенеруючого обладнання. З огляду на необхідність безаварійної роботи агрегату протягом тривалого терміну при забезпеченні пікових навантажень електромережі для всіх деталей проведені розрахунки складнонапруженого стану, які дозволили створити конструкцію, що відповідає кращим світовим стандартам.

Гідрогенератор-двигун з'єднується зі зворотною вертикальною радіально-осьовою гідромашиною установкою (насос-турбіна) типу ОРО 170-В-730 виробництва ВАТ «Турбоатом». Конструкція гідрогенератора-двигуна забезпечує заміну пошкоджених та зношених деталей, виробництво поточних і капітальних ремонтів без повного розбирання гідрогенератора-двигуна і порушення осі валу гідроагрегату. Електрогенеруюча машина відповідає кліматичному виконанню «УХЛ» (категорія розміщення 4, згідно з ГОСТ 15150-69).

Через максимальні масогабаритні параметри (табл. 1) до гідрогенераторів ставляться додаткові вимоги, які необхідно враховувати при встановленні енергетичного устаткування.

За результатами моделювання геометрії та теплових характеристик гідрогенератора-двигуна отримано основні характеристики, які наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Основні характеристики гідрогенератора-двигуна.

Найменування параметру	Режим генератора	Режим двигуна
Номінальна потужність, МВ·А / МВт	360 / 324	430 / 416
Номінальна напруга, В	15750	15750
Номінальний коефіцієнт потужності	0,90	0,979
Номінальна частота обертання, об/хв	150	150
Розгінна частота обертання (без урахування підвищення тиску напору), об/хв	210	210
Максимальна частота обертання при скидах навантаження, об/хв	240	240
Частота, Гц	50	50
Номінальний струм статора, А	13200	15765
Струм збудження при неробочому ході, А	1230	1230
Номінальний струм збудження, А	2050	1990

Гідрогенератор-двигун типу СВО-1255/255-40 УХЛ4 синхронний трифазний вертикальний оборотний, призначений для роботи на Дністровській ГАЕС. Ця ГАЕС призначена для використання як джерело пікової потужності, аварійного та частотного резерву, споживач енергії в години провалу графіка навантаження, джерело і споживач реактивної потужності.

Особливістю конструкції гідрогенератора-двигуна є наявність високо напруженого вузла – «Міжполюсна перемичка», який виконує функцію з'єднання електричного кола полюсів між собою. Навантаження, що сприймаються вузлом, викликані тепловим нагріванням та дією відцентрової сили. На основі розробленої методики оцінки складнонапруженого стану та теплового впливу на елементи конструкції генераторів проведено розрахункові дослідження з визначення причин

руйнування вузла. Зміну температури в різних точках перемички зі зміною за часом подано на рис. 7. Графіки зміни напружень і переміщень наведені на рис. 8 та 9 відповідно.

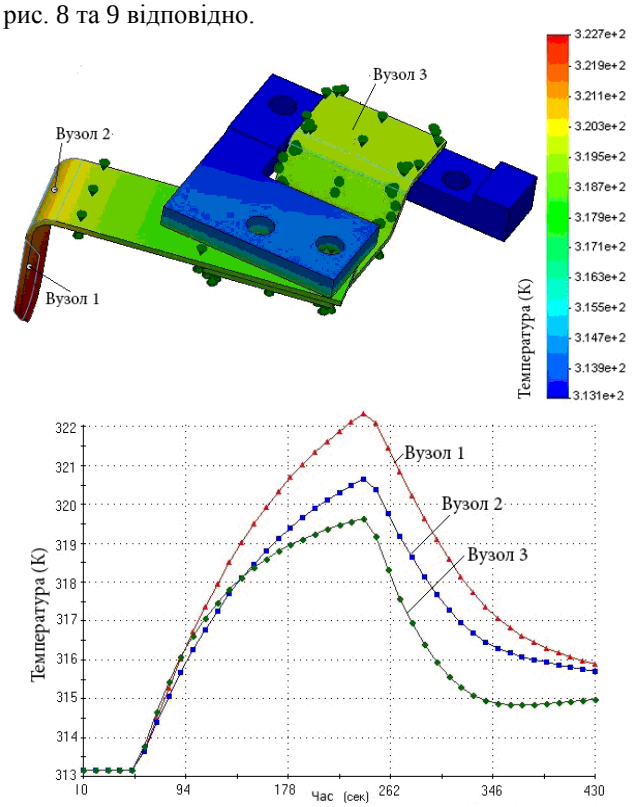


Рис. 7 – Зміна температури

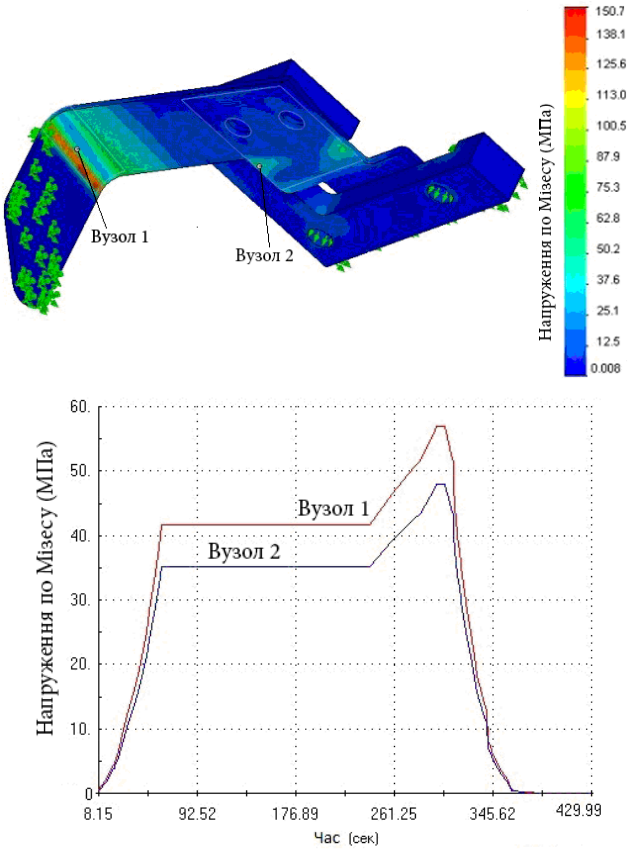


Рис. 8 – Зміна напружень

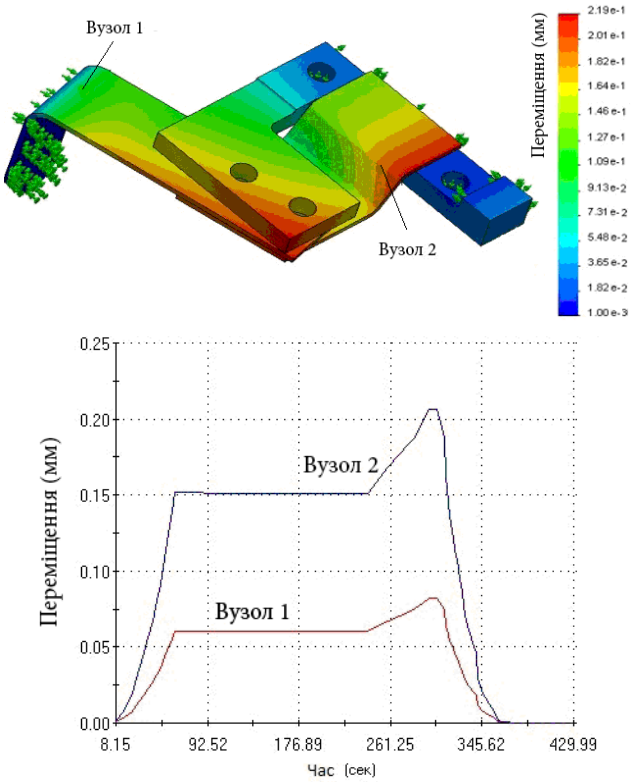


Рис. 9 – Зміна переміщень

Для оцінки часу до руйнування була застосована залежність середнього числа циклів до руйнування від амплітуди змінної напруги, отриманої на основі експериментальних даних, проведених спеціалістами на експериментальній базі Державного підприємства «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ».

Згідно з отриманими результатами, зміна температурного режиму впливає на роботу вищевказаного вузла. Розрахунок дозволив визначити не тільки максимальні напруження, а й характер їх зміни в часі. Урахування виникнення різних переміщень в конструкції дозволяє спрогнозувати руйнування конструкції до його появи. Оцінка показала, що час до руйнування вузла з урахуванням установки додаткових упорів складе понад 30000 циклів, що відповідає нормам щодо проектування та експлуатації гідрогенераторів.

Висновки. Розроблено методику проведення розрахункових досліджень теплового та складнонапруженого стану потужних турбо- та гідрогенераторів. За допомогою цієї методики у програмному комплексі SolidWorks Simulation виконано побудову та вибір найбільш раціональної геометрії потужних турбо- та гідрогенераторів. Використання сучасних підходів до конструювання геометрії та моделювання аеро- і газодинамічних процесів дозволило створити потужні генератори нового поління з підвищеними показниками надійності, довговічності та ремонтопридатності. Це забезпечує високу економічність, надійність та маневреність електрогенеруючого устаткування, дає можливість розв'язувати проблему оновлювання турбо- та гідрогенераторного парку України та розширює експортні можливості енергопідприємств

нашої держави, що дозволить зробити суттєвий внесок у її економічний розвиток.

Проведено роботу з аналізу аварійних ситуації та розрахунку теплового та складнонапруженого стану найбільш напружених елементів, що дає можливість:
– при проектуванні турбогенераторів великої потужності виконувати механічні розрахунки, що будуть враховувати теплові, електричні та механічні навантаження, викликані дією відцентрових сил;
– при розрахунку великих корпусних деталей та підшипникових вузлів враховувати не тільки сили, що викликані електричними чинниками та дією маси основних деталей на конструкцію, а й сили від збиткового тиску у корпусі;
– враховувати криві втомлюваності, а сталь, що використовується, має витримувати навантаження протягом 30 років.

З використанням розробленої методики проведено розрахункові дослідження з проектування й моделювання потужних турбо- та гідрогенераторів. Це дозволило створити енергетичні установки нового покоління з показниками ефективності та надійності, які відповідають світовим вимогам, що пред'являються до енергетичного устаткування.

Побудовано турбогенератор ТГВ-550-2МУ3 (електричною потужністю 550 МВт) та розроблено технічні умови для його впровадження при безпосередньому з'єднанні з паровою турбіною та встановлення в закритому приміщенні Екібастузської ДРЕС, на існуючий фундамент для турбогенератора ТГВ-500-2 (підтверджується актом впровадження).

Згідно з вимогами ГОСТ 533-2000 для турбогенераторів потужністю понад 350 МВт напрацювання на відмову складає 18000 год, що відповідає повному призначеному терміну служби 40 років. При розрахунку методом скінченних елементів термін служби обмотки при роботі в полі відцентрових сил (n = 3000 об/хв) склав 106 циклів. Згідно розрахунковими результатами отримано конструктивні параметри турбогенератора ТГВ-550-2МУ3, який є самим потужним із тих, що виробляються енергобудівними підприємствами України.

Також спроектовано та розроблено технічні умови для потужного вертикального оборотного гідрогенератора-двигуна СВО2-1255/255-40 УХЛ4 (потужністю у режимі генератора 324 МВт, у режимі двигуна 416 МВт) з метою впровадження на Дністровській ГАЕС для використання як джерела пікової потужності, аварійного та частотного резерву, споживача енергії в години провалу графіка навантаження, джерела і споживача реактивної потужності (підтверджується актом впровадження).

Розроблений гідрогенератор-двигун є найпотужним у Європі та відповідає сучасним світовим вимогам, що ставляться до електрогенеруючого обладнання. З огляду на необхідність безаварійної роботи агрегату протягом тривалого терміну при забезпеченні пікових навантажень електромережі, для всіх деталей проведені розрахунки складнонапруженого стану, які дозволили створити конструкцію, що відповідає кращим світовим стандартам.

Відповідність роботі пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності. Відповідно до Закону України від 08.09.2011 № 3715-VI «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» із змінами, внесеними згідно із Законом України № 5460-VI (5460-17) від 16.10.2012, ВВР, 2014, № 2-3, ст.41: Стратегічному пріоритетному напряму на 2011-2021 роки: освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії.

Відповідно до Закону України від 11.07.2001 № 2623 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» зі змінами, внесеними згідно із законами України від 09.02.2006 № 3421, від 09.09.2010 № 2519, від 16.10.2012 № 5460): енергетика та енергоефективність.

Список літератури

1. Видеман Е. Конструкция электрических машин / Е. Видеман, В. Келленбергер. – Л.: Энергия, 1972. – 520 с.
2. Машины электрические. Общие технические требования: ГОСТ 183-74. – [Взамен ГОСТ 183-66; введ. 01.01.76]. – М.: Издательство стандартов, 1974. – 27 с. – (Межгосударственный стандарт).
3. Специальные электрические машины / [А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин и др.]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 552 с.
4. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин / А.Е. Алексеев. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 427 с.
5. Брускин Д.Э. Электрические машины и микромашины / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1990. – 528 с.
6. Важнов А.И. Электрические машины / А.И. Важнов. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
7. Вольдек А.И. Электрические машины: [учебн. для студентов высших техн. учебн. завед.] / А.И. Вольдек. – [3-е изд., перераб.]. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
8. Виноградов Н.В. Проектирование электрических машин / Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов, П.С. Сергеев. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
9. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.

References (transliterated)

1. Videman E. Konstrukcija jelektricheskih mashin / E. Videman, V. Kellenberger. – L.: Jenergija, 1972. – 520 s.
2. Mashiny jelektricheskie. Obshhie tehnicheskie trebovanija: GOST 183-74. – [Vzamen GOST 183-66; vved. 01.01.76]. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1974. – 27 s. – (Mezhgosudarstvennyj standart).
3. Special'nye jelektricheskie mashiny / [A.I. Bertinov, D.A. But, S.R. Mizjurin i dr.]. – M.: Jenergoizdat, 1982. – 552 s.
4. Alekseev A.E. Konstrukcija jelektricheskih mashin / A.E. Alekseev. – M.-L.: Gosjenergoizdat, 1958. – 427 s.
5. Bruskin D.Je. Jelektricheskie mashiny i mikromashiny / D.Je. Bruskin, A.E. Zorohovich, V.S. Hvostov. – M.: Vysshaja shkola, 1990. – 528 s.
6. Vazhnov A.I. Jelektricheskie mashiny / A.I. Vazhnov. – L.: Jenergija, 1974. – 840 s.
7. Vol'dek A.I. Jelektricheskie mashiny: [uchebn. dlja studentov vysshih tehn. uchebn. zaved.] / A.I. Vol'dek. – [3-e izd., pererab.]. – L.: Jenergija, 1978. – 832 s.
8. Vinogradov N.V. Proektirovanie jelektricheskih mashin / N.V. Vinogradov, F.A. Gorjainov, P.S. Sergeev. – M.:Jenergija, 1969. – 632 s.
9. Goldberg O.D. Proektirovanie jelektricheskih mashin / O.D. Gol'dberg, Ja. S. Gurin, I. S. Sviridenko. – M.: Vysshaja shkola, 1984. – 431 s.

Надійшла (received) 12.02.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розроблення й впровадження перспективних методів розрахунку і моделювання при проектуванні та експлуатації потужних турбогенераторів та гідрогенераторів для ТЕС, АЕС, ГЕС, ГАЕС / К.О. Кобзар, О.В. Третяк, О.Ю. Шуть, В.Р. Полієнко, П.Г. Гакал, Є.С. П'ятницька // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 38–45. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Разработка и внедрение перспективных методов расчета и моделирования при проектировании и эксплуатации мощных турбогенераторов и гидрогенераторов для ТЭС, АЭС, ГЭС, ГАЭС / К.О. Кобзарь, О.В. Третьяк, О.Ю. Шуть, В.Р. Полиенко, П.Г. Гакал, Е.С. Пятницкая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 38–45. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Development and implementation of promising methods and model engineering during the design and operation of powerful turbogenerators and hydrogenerators / K.O. Kobzar, O.V. Tretiak, O.Yu. Shut, V.R. Poliienko, P.G. Gakal, Y.S. Pyatnitskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 38–45. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кобзар Костянтин Олександрович, головний конструктор з турбогенераторів, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299; e-mail: kk7@ukr.net.

Кобзарь Константин Александрович, главный конструктор по турбогенераторам, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский, 299.

Kobzar Konstantin, SE "Plant" Electrotyazhmash", Cheef Designer on Turbogenerators, 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine.

Третяк Олексій Володимирович, кандидат технічних наук, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», заступник завідувача відділом; 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299; e-mail alex3tretjak@mail.ru.

Третьяк Алексей Владимирович, кандидат технических наук, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», заместитель заведующего отделом; 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский, 299.

Tretiak Oleksii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), SE "Plant" Electrotyazhmash", Deputy Head of Department, 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine.

Шуть Олександр Юрійович, заступник начальника відділу проектування гідрогенераторів і КМПТ, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299.

Шуть Александр Юрьевич, заместитель начальника отдела проектирования гидрогенераторов и КМПТ, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский, 299.

Shut Oleksandr, SE "Plant" Electrotyazhmash", Deputy Head of Department on Hydrogenerators and LDCM, 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine.

Полієнко Владислав Русланович, інженер-конструктор, магістрант, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», НАУ «ХАІ»; 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299; e-mail: vlad_polienko@outlook.com.

Полиенко Владислав Русланович, инженер-конструктор, магистрант, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», НАУ «ХАИ»; 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский 299; e-mail: vlad_polienko@outlook.com.

Poliienko Vladyslav, design engineer, master student, SE "Plant" Electrotyazhmash"; NAU "KhAI"; 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine; e-mail: vlad_polienko@outlook.com.

Гакал Павло Григорович, доктор технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет; e-mail: pavlo.gakal@gmail.com.

Гакал Павел Григорьевич, доктор технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет; e-mail: pavlo.gakal@gmail.com.

Gakal Pavlo, Doctor of Technical Sciences, Docent, National Aerospace University, Associate Professor at the Department of Thermal Engineering Aerospace.

П'ятницька Євгенія Святославівна, інженер-конструктор, студент, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», НАУ «ХАІ»; 61089, Україна, м. Харків, пр-т Московський, 299; e-mail: PyatnitskayaES@bigmir.net

Пятницкая Евгения Святославовна, инженер-конструктор, студент, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», НАУ «ХАИ»; 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский 299; e-mail: PyatnitskayaES@bigmir.net

Pyatnitskaya Yevgeniya, design engineer, student, SE "Plant" Electrotyazhmash"; NAU "KhAI"; 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine. e-mail: PyatnitskayaES@bigmir.net

УДК 629.12-8:629.12.037

П. С. ЧЕРНИКОВ, В. А. ЯРОВЕНКО, Е. И. ЗАРИЦКАЯ

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХОДОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ

Розглядаються маневрені режими гребних електроенергетичних установок електроходів. Запропоновано показники, що оцінюють якість виконання маневрових операцій. Вони оцінюють маневреність електроходів і якість електроенергії суднової мережі. Виявлено параметри, що впливають на ці показники. Оцінено ступінь їх впливу. Запропоновано аналітичні залежності, що показують внесок кожного параметра в відповідний показник. Виявлено значущі параметри. Показана можливість поліпшення показників якості при проектуванні електроенергетичних установок.

Ключові слова: гребні електроенергетичні установки, показники якості маневрування, залежності показників від параметрів електроходів.

Рассматриваются маневренные режимы гребных электроэнергетических установок электроходов. Предложены показатели, оценивающие качество выполнения маневренных операций. Они оценивают маневренность электроходов и качество электроэнергии судовой сети. Выявлены параметры, влияющие на эти показатели. Оценена степень их влияния. Предложены аналитические зависимости, показывающие вклад каждого параметра в соответствующий показатель. Выявлены значимые параметры. Показана возможность улучшения показателей качества при проектировании электроэнергетических установок.

Ключевые слова: гребные электроэнергетические установки, показатели качества маневрирования, зависимости показателей от параметров электроходов.

Urgency of the problem. At present, the most promising ships are the ships with an integral ship's electric power system. Such a power plant provides both a propulsion system and ship's general consumers with power. This significantly increases the requirements for the quality of the ship's electricity network. Electric ships have a considerable share of time working at maneuvers. Therefore, the urgent task is to increase the electric ship's maneuverability, at the same time ensuring the appropriate quality of electrical energy. **State of the issue under consideration.** During maneuvering regimes the duration of the transient processes in electrical propulsion power plant (EPP) are commensurable with the duration of the transient regimes of the ship's movement. Therefore, the analysis of operating modes of EPP should be carried out in unity with all the components of an indivisible ship's propulsion complex, which includes EPP, propellers, and ship's hull. To analyze maneuvering regimes, a mathematical model and a calculation method have been developed. At the same time, the analysis of transient operating modes is complicated by the fact that the number of the parameters of the complex is large, and the amount of information necessary for their calculation is limited. It is necessary to identify significant parameters for each quality index of maneuvering and quality index of electrical energy. **The purpose of this paper** is to find meaningfully influencing parameters, to identify the nature and extent of their influence. **Method of solving the problem.** The search for significant parameters and the quantitative assessment of the degree of their influence is based on the calculation results of the current values of the regime indices of EPP while carrying out major maneuvers. On their basis, the main quality indices of maneuvering and quality indices of the ship's electrical energy are estimated. **Results of the research**. Numerical calculations of transient regimes of EPP at maneuvers and the processing of their results allowed us to analyze the influence of changing the values of the electric ships' parameters on selected quality indices. Based on the results of the analysis, parameters with significant influence were identified. The degree of influence of each parameter on the corresponding quality index is represented by polynomial dependencies with contributions to each parameter. The influence of the other parameters is unessential and they can be assumed to be invariable in the future. **Conclusions.** Significant parameters, among all the parameters influencing the quality indices of electric ships' EPP, were revealed. This enables us to identify the objective laws of the processes under consideration, and in the future to reduce the amount of computing work. The proposed analytical dependences show the ways to improve the quality of transient processes of EPP at the earliest stages of design.

Key words: electrical propulsion power plants, quality indices of maneuvering, dependences of indices on electric ships' parameters.

Актуальность задачи. В последние годы в теории и практике электродвижения все большее внимание уделяется электроходам с единой судовой электроэнергетической системой (ЕЭЭС). Такая установка обеспечивает питанием и систему электродвижения (гребную электрическую установку) и общесудовые потребители. Как показывает практика, ЕЭЭС обладают рядом неоспоримых преимуществ перед автономными системами электродвижения. В наибольшей степени эти преимущества проявляются на: судах, у которых есть мощные потребители, работающие в режиме, раздельном во времени от системы электродвижения; на судах, работающих в режиме позиционирования; на кораблях военно-морского флота с мощными комплексами вооружения. Применение единых систем электродвижения позволяет: сократить количество генераторных агрегатов, уменьшить массогабаритные характеристики источников электроэнергии, снизить расход энергии и вредных выбросов в окружающую среду, улучшить компоновку энергетического оборудования (высвободив при этом дополнительные площади), повысить надежность судовой электроэнергетической установки.

Вместе с тем, тот факт, что общесудовые потребители электроэнергии получают питание от общих шин судовой электростанции, существенно повышает требования к качеству электроэнергии. В соответствии с требованиями международного стандарта [7], это качество определяется следующими основными показателями:

– частотными характеристиками;

– характеристиками напряжения;

– пусковыми характеристиками дизель-генераторов;

– характеристиками параллельной работы дизель-электрических агрегатов.

Известно, что одним из основных аргументов в пользу применения электродвижения является высокая маневренность электроходов. Именно высокие маневренные свойства (а это – неоспоримое преимущество электродвижения перед традиционным типом привода судовых движителей) в первую очередь обеспечивают безопасность выполнения судами маневренных операций [1]. Гребная электрическая уста-

© П.С. Черников, В.А. Яровенко, Е.И. Зарицкая, 2018

новка – наибольший по мощности потребитель, поэтому переходные режимы ее работы неизбежно сказываются на параметрах судовой сети. Исходя из этого, показатели качества маневрирования и показатели качества электроэнергии (на маневрах) должны рассматриваться как единый комплекс показателей работы ЕЭЭС. Повышение маневренности электроходов с обеспечением при этом соответствующего [7] качества электроэнергии является весьма актуальной задачей.

Состояние рассматриваемого вопроса. На маневрах продолжительности переходных процессов в гребной электроэнергетической установке (ГЭЭУ) соизмеримы [1] с продолжительностями переходных процессов движения самого судна. Поэтому анализ режимов работы ГЭЭУ следует проводить в единстве со всеми составными частями судового пропульсивного комплекса, включающего в себя и ЕЭЭС, и гребные винты, и корпус судна.

Для расчета переходных процессов и оценки маневренных характеристик ГЭЭУ электроходов в работе [3] разработана математическая модель. Однако, представленное в ней математическое описание переходных процессов в ГЭЭУ не учитывало динамические режимы работы тепловых двигателей и синхронных генераторов. В соответствии с этим, не учитывалось влияние на показатели качества маневрирования параметров тепловых двигателей, регуляторов скорости вращения, системы автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов и систем распределения нагрузки между генераторными агрегатами. А это влияние может быть весьма существенным. Упрощенное описание динамики генераторных агрегатов не позволяло также оценить и показатели качества электроэнергии при выполнении маневренных операций. Таким образом, математическое описание переходных процессов в ГЭЭУ, представленное в работе [3], оказывается непригодным для электроходов с единой электроэнергетической системой.

Для анализа маневренных режимов электроходов с ЕЭЭС в [1] предложены уточненная математическая модель и метод расчета переходных режимов ГЭЭУ как составной части судового пропульсивого комплекса. В ней представлено уточненное математическое описание переходных процессов в генераторных агрегатах судовой электростанции. В частности: первичные двигатели описаны уравнениями, учитывающими процессы в регуляторах скорости их вращения, с возможностью регулирования процесса распределения активной мощности; синхронные генераторы представлены уравнениями Парка-Горева, с учетом возможности распределения реактивной мощности.

Математическая модель приведена к относительным единицам. Выявлены критерии динамического подобия пропульсивных комплексов. Это – безразмерные параметры системы «тепловые двигатели – гребная электрическая установка – движители – корпус судна». Именно эти параметры влияют на текущие значения относительных режимных показателей составных частей комплекса и определяют численные значения показателей качества маневрирования и качества электроэнергии.

Анализ переходных режимов работы, с целью их дальнейшего улучшения затруднен тем, что число безразмерных параметров велико, а объем информации, необходимой для их расчета, на начальных стадиях проектирования объектов весьма ограничен. Поэтому определение численных значений этих параметров весьма проблематично. Количественный анализ поведения ГЭЭУ на маневрах и поиски путей улучшения маневренных характеристик оказываются нереализуемыми.

В тоже время известно [2, 3], что значимое влияние на показатели качества работы сложных электромеханических систем оказывает лишь небольшое (до 6–10) число параметров. В соответствии с этим, необходимо выявить по каждому показателю качества значимые параметры и оценить вклады этих параметров в соответствующие показатели. Остальные параметры можно будет отнести к шумовому полю и в дальнейших исследованиях считать неварьируемыми. Это позволит в дальнейшем существенно сократить объем вычислительных процедур.

Поиск значимо влияющих параметров, выявление характера и степени их влияния и является **целью настоящей работы.**

Метод решения задачи. Разработанный в [1] метод позволяет рассчитывать текущие значения основных режимных показателей ГЭЭУ как в установившихся, так и в динамических режимах работы и оценивать основные показатели качества работы электроходов на маневрах. Предложенное математическое описание дает возможность учитывать при маневрировании влияние переходных режимов в гребной электрической установке на работу общесудовых потребителей электроэнергии. Это позволяет ввести в состав основных показателей качества ряд дополнительных (по сравнению с работой [3]), критериев, характеризующих динамические параметры напряжения и частоты на выходе генераторов (согласно стандарту ISO 8528-5). В частности:

– отклонение напряжения в переходном процессе при повышении нагрузки или ее снижении (δU^{-}_{dyn}, δU^{+}_{dyn});

– время восстановления напряжения ($t_{u\,in}$, $t_{u\,de}$);

– отклонение частоты в переходном процессе (от начальной частоты) при повышении нагрузки или ее снижении (δf^{-}_{dyn}, δf^{+}_{dyn});

– время восстановления частоты ($t_{f\,in}$, $t_{f\,de}$).

Эти показатели характеризуют качество электроэнергии судовой сети.

В основе поиска значимо влияющих параметров и количественной оценки степени их влияния лежат результаты расчетов переходных режимов ГЭЭУ в составе пропульсивных комплексов на маневрах. На рис. 1, в качестве примера, приведены текущие значения основных режимных показателей при выполнении электроходом комбинации нескольких маневров «разгон ГЭЭУ – реверс ГЭЭУ на задний ход – реверс ГЭЭУ с заднего хода на передний». На таком «комбинированном маневре» в наибольшей степени «проявляются» динамические показатели работы ГЭЭУ.

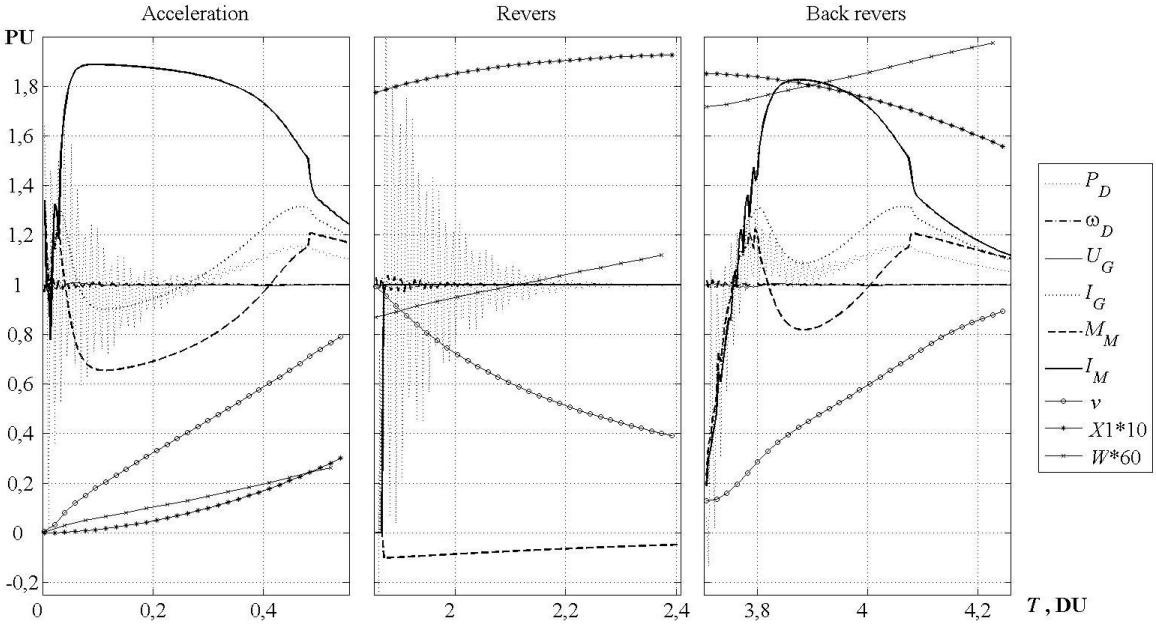


Рис.1 – Текущие значения основных режимных показателей электрохода при выполнении комбинации маневров "разгон – реверс на задний ход – реверс с заднего хода на передний"

На рисунке показаны относительные:

– P_D и ω_D – мощность и угловая скорость вращения первичных двигателей;

– U_G и I_G – напряжение и ток на выходе генераторов;

– M_M и I_M – вращающий момент и ток гребных электродвигателей (ГЭД);

– v – скорость судна;

– $X1$ – пройденный путь;

– W – затраты энергии.

Относительное время при этом определяется:

$$T = \frac{\mathbf{v}_0}{L} t ,$$

где v_0 – скорость движения судна;

L – длина судна;

t – текущее, по ходу выполнения маневра, время.

(Индекс "$_0$" относится к режиму работы, соответствующему движению судна с номинальной мощностью двигателей по спокойной свободной воде).

Результаты многочисленных расчетов переходных режимов при различных маневрах [3, 4], практика проектирования и эксплуатации электроходов [5, 6], рекомендации [7] по оценке качества электроэнергии судовой сети дают основания предложить для оценки качества работы ГЭЭУ (в составе пропульсивных комплексов) на маневрах следующие показатели:

– максимальное приращение мощности первичных двигателей

$$P_{D\text{m}} = P_{D\max} / P_{Dstd};$$

– относительное отклонение частоты на выходе генераторов при повышении

$$\delta f^{-}_{dyn} = [(f_{dyn\,\min} - f_{Gstd}) / f_{Gstd}]\ 100\%$$

и снижении нагрузки

$$\delta f^{+}_{dyn} = [(f_{dyn\,\max} - f_{Gstd}) / f_{Gstd}]\ 100\%;$$

– относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении

$$\delta U^{-}_{dyn} = [(U_{dyn\,\min} - U_{Gstd}) / U_{Gstd}]\ 100\%$$

и снижении нагрузки

$$\delta U^{+}_{dyn} = [(U_{dyn\,\max} - U_{Gstd}) / U_{Gstd}]\ 100\%;$$

– время восстановления напряжения на выходе генераторов при повышении $t_{u\,in}$ и снижении мощности $t_{u\,de}$;

– броски тока генераторов при разгоне

$$I_{Gacc} = I_{Gacc\max} / I_{Gaccstd}$$

и при реверсе

$$I_{Grev} = I_{Grev\max} / I_{Grevstd};$$

– время восстановления частоты на выходе генераторов при повышении $t_{f\,in}$ и снижении мощности $t_{f\,de}$;

– броски вращающего момента ГЭД при разгоне

$$M_{Macc} = M_{Macc\max} / M_{Maccstd}$$

и при реверсе

$$M_{Mrev} = M_{Mrev\max} / M_{Mrevstd};$$

– броски тока ГЭД при разгоне

$$I_{Macc} = I_{Macc\max} / I_{Maccstd}$$

и при реверсе

$$I_{Mrev} = I_{Mrev\max} / I_{Mrevstd};$$

– максимальная скорость судна к концу маневра – $v_{\max}$;

– продолжительность выполнения маневра – T_M;

– пройденный судном путь по окончанию маневра – $X1$;

– относительные затраты энергии на выполнение маневра – W;

– продолжительность разгона электрохода до заданного значения скорости судна – T_{Mpset} (здесь и далее под заданной будет подразумеваться скорость $v = 0{,}95\ v_0$);

– пройденный судном путь до заданного значения скорости судна – $X1_{pset}$;

– относительные затраты энергии до заданного значения скорости судна – W_{pset}.

Численные значения этих показатели качества (кроме W), определяются в ходе расчетов текущих значений (например, рис.1) соответствующих режимных показателей. Относительные затраты энергии W рассчитываются [4] по соотношению

$$\overline{W} = \int_0^T \overline{g_e}\,\overline{M_D}\,\overline{\omega_D} dT, \qquad (1)$$

где $\overline{M_D}$ и $\overline{\omega_D}$ – относительный момент и угловая скорость вращения теплового двигателя;

$\overline{g_e} = g_e / g_{e0}$ – относительный текущий удельный расход топлива, определяемый [4] как

$$\overline{g_e} = \begin{cases} 0{,}983 + 1{,}22\left(P_D - 0{,}882\right)^2, \text{при } P_D \ge 0{,}882 \\ 0{,}983 + 0{,}315\left(P_D - 0{,}882\right)^2, \text{при } P_D < 0{,}882 \end{cases} \qquad (2)$$

Сравнительный анализ математических моделей, приведенных в работах [3] и [1], указывает на необходимость в оценке степени влияния на показатели качества маневрирования следующих безразмерных параметров:

– коэффициентов усиления по основному сигналу – K_{Uq} и по возмущающему воздействию – K_{Id} системы возбуждения синхронного генератора;

– коэффициентов усиления по регулируемой величине (изменению скорости вращения теплового двигателя) – K_P и жесткой обратной связи – K_{Fb} хода рейки топливного насоса;

– критерия динамического подобия теплового двигателя N_D;

– энерговооруженности электрохода – N_X;

– критерия динамического подобия N_M и безразмерных параметров C_{M17}, C_{M18}, C_{M20}, C_{M23} частотно-управляемого ГЭД.

Численные значения этих параметров и критериев подобия рассчитываются [1] по соотношениям:

$$K_{Uq} = \frac{U_{G0}}{U_{f0}};\ K_{Id} = \frac{I_{G0} x_d}{U_{f0}};$$

$$C_{M17} = \frac{b_M^2}{r_{2M}'^2};\ C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}'^2}\alpha_0^2;$$

$$C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1MH}};\ C_{M23} = 2\frac{r_{1M}}{r_{2M}'}\alpha_0$$

$$N_D = \frac{M_{D0} L}{J_D \omega_{D0} v_0};\quad N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0};\quad N_X = \frac{L P_{e0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2},$$

где U_{G0} и I_{G0} – напряжение и ток генератора;

U_{f0} – напряжение обмотки возбуждения генератора;

x_d – синхронное индуктивное сопротивление по оси d;

ω_{D0} – угловая скорость вращения первичного двигателя;

ω_{M0} и $\omega_{1Mн}$ – угловые скорости вращения ротора и магнитного поля статора ГЭД при номинальной частоте;

α_0 – относительная частота напряжения ГЭД;

r_{1M} и r_{2M}' – активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора ГЭД;

b_M, c_M, d_M, e_M – постоянные коэффициенты частотно-управляемого асинхронного электродвигателя;

M_{D0}, M_{M0} – вращающие моменты первичного двигателя и ГЭД соответственно;

J_D, J_M – приведенные к валу первичного двигателя и ГЭД (соответственно) моменты инерции вращающихся частей;

m и λ_{11} – масса судна и присоединенные массы воды вдоль его продольной оси;

P_{e0} – полезный суммарный упор гребных винтов.

Результаты исследований. Анализ конструктивных и основных технических параметров существующих электроходов позволил определить возможные диапазоны изменения отмеченных выше безразмерных параметров и критериев подобия.

Серии численных расчетов переходных режимов ГЭЭУ на маневрах (выполненные по разработанному [1] методу расчета) и обработка их результатов позволили проанализировать влияние изменения значений (во всем возможном диапазоне их изменения) всех отмеченных коэффициентов и критериев динамического подобия на выбранные показатели качества маневрирования. По результатам анализа из всей совокупности параметров выявлены те, влияние которых на выбранные показатели качества значимо, с вкладом более 2%. Это безразмерные параметры: N_D, N_X, N_M, C_{M17}, C_{M18}, C_{M20}, C_{M23}. Влияние остальных параметров – K_{Uq}, K_{Id}, K_P, K_{Fb} – несущественно, и их можно (теперь уже обоснованно) отнести к шумовому полю и в дальнейшем принимать неварьируемыми.

В качестве примера, в табл. 1 показано влияние на показатели качества маневрирования изменения значений безразмерных параметров N_X и C_{M23}. При этом, в ходе численных экспериментов, для выявления степени влияния параметров комплекса на показатели качества, обратные связи систем автоматического регулирования были «отключены». В результате, численные значения показателей качества получаются явно завышенными, однако это позволяет выявить степень значимости влияния каждого параметра. Именно это и является целью настоящей работы.

Окончательные результаты анализа влияния безразмерных параметров на выбранные показатели качества маневрирования приведены в табл. 2. При этом вклады, величиной менее 2 % (0,2 % – для относительного отклонения частоты и относительного отклонения напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки) не учитываются.

Таблица 1 – Влияние изменения безразмерных параметров N_X и C_{M23} на основные показатели качества маневрирования при реверсе судна

Показатель качества	Влияние параметра N_X						Влияние параметра C_{M23}					
	0,13	0,14	0,16	0,18	0,20	0,21	0,03	0,32	0,60	0,90	1,20	1,47
Максимальное приращение мощности первичных двигателей P_{Dm}	2,33	1,92	1,93	1,41	1,97	1,89	1,87	1,36	1,39	1,40	1,41	1,41
Относительное отклонение частоты на выходе генераторов при повышении нагрузки δf^{-}_{dyn}, %	10,8	7,55	8,69	6,69	8,94	8,66	6,65	5,99	6,62	6,7	6,7	6,69
Относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки δU^{-}_{dyn}, %	2,92	3,9	3,86	1,8	6,12	4,64	3,61	1,86	1,83	1,86	1,88	1,8
Время восстановления напряжения на выходе генераторов при повышении мощности $t_{u\,in}$, с	2,05	1,4	1,4	1,1	1,4	1,35	1,3	1,15	1,15	1,1	1,1	0,95
Броски тока генераторов при реверсе I_{Grev}	1,34	1,56	1,46	1,28	1,28	1,28	1,44	1,31	1,30	1,29	1,28	1,28
Время восстановления частоты на выходе генераторов при повышении мощности $t_{f\,in}$, с	2,55	2,05	1,7	0,55	1,05	1,25	1,25	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Броски вращающего момента ГЭД при реверсе M_{Mrev}	1,26	1,59	1,39	1,15	1,32	1,27	1,48	1,24	1,23	1,21	1,19	1,13
Броски тока ГЭД при реверсе I_{Mrev}	1,94	2,06	1,95	1,82	1,82	1,85	1,8	1,83	1,83	1,82	1,82	1,82
Максимальная скорость $v_{\max}$, о.е.	0,91	0,95	0,98	0,99	0,99	0,99	1	1	0,99	0,99	0,99	0,99
Время маневра T_M, о.е.	1,82	1,49	1,26	1,29	1,4	1,43	1,13	1,18	1,2	1,23	1,27	1,32
Выбег $X1$, о.е.	11,6	12,1	10,9	11,9	14	14,8	10,5	10,9	11	11,3	11,6	12
Затраты энергии W, о.е.	106	85,5	74,2	73	81	80,6	68,5	67	68,3	70,1	72,2	74,7
Время выхода на заданную скорость T_{Mpset}, о.е.	-	-	0,9	0,73	0,67	0,72	0,61	0,66	0,69	0,72	0,75	0,78
Выбег на заданную скорость $X1_{pset}$, о.е.	-	-	6,41	4,9	4,66	5,54	3,8	4,3	4,5	4,8	5	5,3
Затраты энергии до достижения судном заданной скорости W_{pset}, о.е.	-	-	53,9	42,3	41	41,9	40,1	39,1	40,4	42	43,5	45,2

Таблица 2 – Вклады безразмерных параметров в показатели качества маневрирования при реверсе ГЭЭУ электрохода

Показатель качества маневрирования	Вклады безразмерных параметров						
	N_D	N_X	N_M	C_{M17}	C_{M18}	C_{M20}	C_{M23}
Максимальное приращение мощности первичных двигателей $P_{D\text{m}}$	19,1	66	-	-	6,8	6,7	52,8
Относительное отклонение частоты на выходе генераторов при повышении нагрузки δf^{-}_{dyn}	4,9	4,1	-	-	-	-	2,7
Относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки δU^{-}_{dyn}	0,5	4,3	-	-	0,5	0,5	2
Время восстановления напряжения на выходе генераторов при повышении мощности $t_{u\,in}$	13,7	86,4	-	-	50	18,2	31,8
Броски тока генераторов при реверсе I_{Grev}	-	21,6	-	-	13	-	12,4
Время восстановления частоты на выходе генераторов при повышении мощности $t_{f\,in}$	54,6	363,6	-	-	-	-	127,3
Броски вращающего момента ГЭД при реверсе M_{Mrev}	-	38,5	4	-	32,2	4,3	30,5
Броски тока ГЭД при реверсе I_{Mrev}	-	13,6	-	-	24,2	8,4	-
Максимальная скорость $v_{\max}$	-	8,9	-	-	2,6	5,7	1,1
Время маневра T_M	3,2	45,3	4,7	3,8	38,2	24,1	14,7
Выбег $X1$	4,2	34,3	6,3	5,3	19,3	23,7	13,4
Затраты энергии W	6,3	47,5	4,5	3,7	37,7	29,6	10,8
Время выхода на заданную скорость T_{Mpset}	-	57,4	-	-	64,2	14,2	23,1
Выбег на заданную скорость $X1_{pset}$	-	82	-	-	51,5	36,9	29,5
Затраты энергии до достижения судном заданной скорости W_{pset}	7	55,8	-	-	58,1	11	13,8

Степень значимости влияния каждого параметра на соответствующий показатель качества можно представить полиномиальными зависимостями с весовыми вкладами по каждому параметру. Эти вклады будем определять как

$$s_{ik} = \frac{\Delta J_k(\Delta q_i)}{\overline{J_k}}, \qquad (3)$$

где $\overline{J_k}$ – среднее значение показателя качества;

$\Delta J_k\ (\Delta q_i)$ – максимальное приращение показателя качества при изменении q_i -го безразмерного параметра в полном диапазоне его изменения.

По результатам табл. 2 для каждого показателя качества получены уравнения вкладов безразмерных параметров в соответствующий показатель:

– максимальное приращение мощности тепловых двигателей

$$P_{D\text{m}} = 1{,}41 - 19{,}1\ N_D - 66\ N_X + 6{,}8\ C_{M18} - \\ - 6{,}7\ C_{M20} + 52{,}8\ C_{M23}; \qquad (4)$$

– относительное отклонение частоты на выходе генераторов при повышении нагрузки

$$\delta f^{-}_{dyn} = 6{,}7 + 4{,}9\ N_D - 4{,}1\ N_X + 2{,}7\ C_{M23}; \qquad (5)$$

– относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки

$$\delta U^{-}_{dyn} = 1{,}81 + 0{,}5\ N_D + 4{,}3\ N_X + 0{,}5\ C_{M18} - \\ - 0{,}5\ C_{M20} - 2\ C_{M23}; \qquad (6)$$

– время восстановления напряжения на выходе генераторов при повышении мощности

$$t_{u\,in} = 1{,}1 + 13{,}6\,N_D - 86{,}4\,N_X - 50\,C_{M18} + \\ + 18{,}2\,C_{M20} - 31{,}8\,C_{M23}; \quad (7)$$

– броски тока генераторов при реверсе

$$I_{Grev} = 1{,}3 + 21{,}6\,N_X - 13\,C_{M18} - 12{,}4\,C_{M23}; \quad (8)$$

– время восстановления частоты на выходе генераторов при повышении мощности

$$t_{f\,in} = 0{,}55 + 54{,}6\,N_D - 363{,}6\,N_X - 127{,}3\,C_{M23}; \quad (9)$$

– броски вращающего момента ГЭД при реверсе

$$M_{Mrev} = 1{,}15 + 38{,}5\,N_X - 4\,N_M - \\ - 32{,}2\,C_{M18} - 4{,}3\,C_{M20} - 30{,}5\,C_{M23}; \quad (10)$$

– броски тока ГЭД при реверсе

$$I_{Mrev} = 1{,}82 - 13{,}6\,N_X + 24{,}2\,C_{M18} - 8{,}4\,C_{M20}; \quad (11)$$

– максимальная скорость к концу маневра

$$v_{\mathrm{MAX}} = 0{,}99 + 8{,}9\,N_X - 2{,}6\,C_{M18} - \\ - 5{,}7\,C_{M20} - 1{,}1\,C_{M23}; \quad (12)$$

– продолжительность маневра

$$T_M = 1{,}26 - 45{,}3\,N_X + 4{,}7\,N_M + 3{,}8\,C_{M17} + \\ + 38{,}2\,C_{M18} - 24{,}1\,C_{M20} + 14{,}7\,C_{M23}; \quad (13)$$

– выбег судна

$$X1 = 11{,}4 - 4{,}2\,N_D + 34{,}3\,N_X + 6{,}3\,N_M - \\ - 5{,}3\,C_{M17} + 19{,}3\,C_{M18} - 23{,}7\,C_{M20} + \\ + 13{,}4\,C_{M23}; \quad (14)$$

– затраты энергии

$$W = 71{,}7 - 6{,}3\,N_D - 47{,}5\,N_X + 4{,}5\,N_M + \\ + 3{,}7\,C_{M17} + 37{,}7\,C_{M18} - 29{,}6\,C_{M20} + \\ + 10{,}8\,C_{M23}; \quad (15)$$

– время выхода на заданную скорость

$$T_{Mpset.} = 0{,}76 - 57{,}4\,N_X + 64{,}2\,C_{M18} - \\ - 14{,}2\,C_{M20} + 23{,}1\,C_{M23}; \quad (16)$$

– выбег на заданную скорость

$$X1_{pset} = 5{,}1 - 82{,}1\,N_X + 51{,}5\,C_{M18} + \\ + 36{,}9\,C_{M20} + 29{,}5\,C_{M23}; \quad (17)$$

– затраты энергии до достижения судном заданной скорости

$$W_{pset} = 44 - 7\,N_D - 55{,}8\,N_X + 58{,}1\,C_{M18} + \\ - 11\,C_{M20} + 13{,}8\,C_{M23}. \quad (18)$$

Безразмерные параметры используются в уравнениях (4)-(18) в нормированном виде. Нормирование проводится по соотношению

$$q_i^n = \frac{q_i - q_{i0}}{\Delta q_i},$$

где q_{i0} – среднее значение i -го параметра;

$\Delta q_i = q_{i\max} - q_{i0} = q_{i0} - q_{i\min}$ – диапазон изменения i -го параметра.

Таким образом, в соответствии с поставленной целью, из совокупности параметров, влияющих на показатели качества работы ГЭЭУ электроходов на маневрах, выявлены значимые параметры. Полученные аналитические зависимости показывают степень и характер их влияния. Остальные параметры можно обоснованно отнести «к шумовому полю» и в дальнейших исследованиях считать неварьируемыми.

Разработанные аналитические зависимости позволяют не только оценивать влияние параметров пропульсивного комплекса на основные показатели качества работы ГЭЭУ, но и уже на самых начальных этапах проектирования отыскивать пути улучшения этих показателей.

Проиллюстрируем это применительно к маневру "реверс электрохода".

Поставим задачу – попытаться уменьшить относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки до 1 %. Из уравнения (6) видно, что параметрами, оказывающими наиболее значимое влияние на этот показатель, являются параметры N_X и C_{M23}, а также, в равной степени, N_D, C_{M18} и C_{M20}.

Для того, чтобы δU^{-}_{dyn} стало равным 1 %, необходимо, чтобы сумма всех (за исключением первого) слагаемых правой части стала равной (–0,81). Иными словами:

$$-0{,}81 = 0{,}5\,N_D + 4{,}3\,N_X + 0{,}5\,C_{M18} - \\ - 0{,}5\,C_{M20} - 2\,C_{M23}; \quad (19)$$

Анализ зависимости (19) показывает, что для уменьшения относительного перепада напряжения на выходе генераторов необходимо параметры N_X и C_{M23} оставить на уровне средних значениях ($N_X = 0{,}17$; $C_{M23} = 1{,}26$), параметр C_{M20} увеличивать до максимального ($C_{M20} = 0{,}97$), а параметр C_{M18} уменьшать до минимального значения ($C_{M18} = 15{,}7$). Параметр N_D должен принимать значение немногим более среднего (1,29) и будет определен из уравнения вкладов.

Уравнение вкладов (19) при этом примет вид:

$$0{,}81 = 2\,(0) - 0{,}5\,N_D - 4{,}3\,(0) - 0{,}5\,(-1) + \\ + 0{,}5\,(1) = 1 - 0{,}54\,N_D; \quad (20)$$

Нормированное значение параметра $N_D^n = 0{,}352$.

Следовательно, безразмерное значение параметра $N_D = 1{,}58$.

В качестве примера рассмотрим проект конкретного электрохода (назовем его «Project») и его ГЭЭУ (табл. 3).

Таблица 3 – Основные характеристики электрохода «Project»

Длина судна по к.в.л.	160 м
Скорость судна	22 узла
Номинальные параметры турбогенераторов:	
количество	2
мощность	36 МВт
напряжение	10,5 кВ
частота вращения	3000 об/мин
частота питания	50 Гц
Номинальные параметры гребных электродвигателей:	
количество	3
мощность	20 МВт
напряжение	3 кВ
ток статора	4496 А
частота вращения	120-165 об/мин
Трансформаторы отбора мощности:	
количество	4
мощность	2,5 МВА

Численные значения соответствующих безразмерных параметров, рассчитанные по приведенным выше соотношениям, приведены в табл. 4.

Вернемся к соотношениям, по которым рассчитываются безразмерные параметры. В них L, v_0, P_{e0}, m, λ_{11} – являются заданными (это параметры судна) и изменяться не могут. Исходя из этого, как следует из полученных соотношений, для поддержания относительного перепада напряжения на выходе генераторов в пределах 1 % необходимо:

– уменьшить момент инерции J_D, приведенный к валу теплового двигателя либо увеличить отношение M_{D0} / ω_{D0} на 23 %;

– уменьшить суммарный упор винтов на 15 %;

– увеличить отношение C_M / r_{2M}' на 29 %;

– уменьшить скольжение ротора АД с 0,04 до 0,03;

– увеличить на 5 % отношение r_{1M} / r_{2M}'.

Проведенный анализ и его рекомендации носят в определенной степени условный характер, поскольку не учитывают влияния этих параметров на другие показатели качества (в некоторых случаях они могут быть нереализуемы). Однако, они четко показывают влияние на качество работы ГЭЭУ основных параметров электроходов и могут быть учтены на предварительных этапах проектирования ГЭЭУ.

Выводы.

1. При анализе динамических режимов работы сложных электромеханических систем важной задачей является определение значимо влияющих параметров и оценка степени их влияния. Это способствует целенаправленности исследований, выявлению объективных закономерностей рассматриваемых процессов, сокращению объема вычислительных работ.

Таблица 4 – Значения безразмерных параметров электрохода «Project»

Параметр	Численные значения параметров	
	"Project"	Требуемое значение
N_D	1,282	1,58
N_X	0,2	0,17
C_{M18}	23,73	63,95
C_{M20}	0,96	0,97
C_{M23}	1,2	1,26

2. Из совокупности параметров, влияющих на показатели качества работы ГЭЭУ электроходов, выявлены значимые параметры. Получены аналитические зависимости, показывающие характер и степень их влияния. Остальные параметры можно принимать неварьируемыми.

3. Предложенные зависимости показывают возможные пути улучшения качества переходных процессов ГЭЭУ электроходов уже на начальных стадиях их проектирования.

Список литературы

1. *Яровенко В. А.* Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов / *В. А. Яровенко, П. С. Черников* // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №6. С. 32-41. **doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.**
2. *Яровенко В. А.* Оценка маневренных характеристик электроходов на начальных стадиях их проектирования / *В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая, П. С. Черников* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворювання енергії, Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №1 (1223). С. 57-63.
3. *Яровенко В. А.* Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов / *В. А. Яровенко*. – Одесса: Маяк, 1999. – 188 с.
4. *Небеснов В. И.* Оптимальные режимы работы судовых комплексов / *В. И. Небеснов*. – М.: Транспорт, 1974. – 199 с.
5. *Айзенштадт Е. Б.* Гребные электрические установки: Справочник / *Е. Б. Айзенштадт, Ю. М. Гилерович, Б. А. Горбунов, В. В. Сержантов.* — 2-е изд., перераб. и доп. – Л: Судостроение, 1985. — 304 с., ил.
6. *Кузнецов Н. А.* Основы проектирования гребных электрических установок. / *Н. А. Кузнецов, П. В. Куропаткин, А. Б. Хайкин, Н. М. Хомяков* – Ленинград: Издательство «Судостроение», 1972. – 656 с.
7. ДСТУ ISO 8528-5:2005 Установки генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 5. Генераторные установки. – К. : Будстандарт, 2005. – 32 с.

References (transliterated)

1. Yarovenko V. A., Chernikov P. S. Metod rascheta perekhodnykh rezhimov grebnykh elektroenergeticheskikh ustanovok elektrokhodov [Calculation method of transient regimes of electric ships' propelling electric plants.] *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no. 6, pp. 32-41. **doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.**
2. Yarovenko V. A., Zaritskaya E. I., Chernikov P. S. Otsenka manevrennykh kharakteristik elektrokhodov na nachal'nykh stadiyakh ikh proektirovaniya [Evaluation of electric ships' maneuverability on the initial stages of their designing]. *Visnyk NTU "KhPI" Seriya: "Elek-*

trychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennya enerhiyi" [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion. "]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 1, pp. 57-63.
3. Yarovenko V. A. *Raschet i optimizatsiya perekhodnykh rezhimov propul'sivnykh kompleksov elektrokhodov* [Calculation and optimization of transient modes of propulsion complexes of electric ships]. – Odessa: Mayak, 1999. – 188 p.
4. Nebesnov V. I. *Optimal'nye rezhimy raboty sudovykh kompleksov* [Optimal operating modes of ship complexes]. – Moscow: Transport, 1974. – 199 p.
5. Aizenshtadt E. B., Gilerovich Yu. M., Gorbunov B. A., Serzhantov V. V. *Grebnye elektricheskie ustanovki: Spravochnik* [Rowing electrical installations: Reference book]. – Leningrad: Shipbuilding Publ., 1985. – 304 p.
6. Kuznetsov N. A., Kuropatkin P. V., Khaikin A. B., Khomyakov N. M. *Osnovy proektirovaniia grebnykh elektricheskikh ustanovok* [Basic design of rowing electrical installations]. – Leningrad: Shipbuilding Publ., 1972. – 656 p.
7. *DSTU ISO 8528-5:2005. Ustanovki generatornye peremennogo toka s privodom ot porshnevykh dvigateley vnutrennego sgoraniya. Chast' 5. Generatornye ustanovki.* [Generator sets of alternating current with a drive from reciprocating internal combustion engines. Part 5. Generator settings.]. Kiev, Budstandart Publ. 2005. 32 p.

Поступила (received) 14.02.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив параметрів електроходів на показники якості роботи електроенергетичних установок при маневруванні / П. С. Черніков, В. О. Яровенко, О. І. Зарицька // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 46–54. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Влияние параметров электроходов на показатели качества работы электроэнергетических установок при маневрировании / П. С. Черников, В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 46–54. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Influence of electric ships' parameters on quality indices of electric power plants' performance at maneuvers / P. S. Chernikov, V. A. Yarovenko, E. I. Zaritskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 46–54. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2409-9295.

«*Сведения об авторах /About the Authors*»

Черніков Павло Сергійович, Одеський національний морський університет, старший викладач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, (099)711-07-00; e-mail: chernikov@onmu.odessa.ua

Черников Павел Сергеевич, Одесский национальный морской университет, старший преподаватель кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, (099)711-07-00; e-mail: chernikov@onmu.odessa.ua

Chernikov Pavel Sergeevich, Odessa National Maritime University, Senior Lecturer of the Department of exploitation of ship's electrical equipment and means of automation, +38 (099)711-07-00; e-mail: chernikov@onmu.odessa.ua

Яровенко Володимир Олексійович, доктор технічних наук, професор, Одеський національний морський університет, завідувач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, (050)598-06-83; e-mail: yarovenko@3g.ua

Яровенко Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Одесский национальный морской университет, заведующий кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, (050)598-06-83; e-mail: yarovenko@3g.ua

Yarovenko Vladimir Alecseevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Odessa National Maritime University, Chair of the Department of exploitation of ship's electrical equipment and means of automation, +38 (050)598-06-83; e-mail: yarovenko@3g.ua

Зарицька Олена Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, (093)368-49-16; e-mail: zarickayalena74@mail.ru

Зарицкая Елена Игоревна, кандидат технических наук, доцент, Одесский национальный морской университет, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, (093)368-49-16; e-mail: zarickayalena74@mail.ru

Zaritskaya Elena Igorevna, Candidate of Technical Sciences, Odessa National Maritime University, Associate Professor of the Department of exploitation of ship's electrical equipment and means of automation, +38 (093)368-49-16; e-mail: zarickayalena74@mail.ru

УДК 621.313.333.2

Р.Н. ЕНОКТАЕВ

КОРРЕКТИРОВКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПОТЕРЬ В СТАЛИ В РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Проведено зіставлення експериментальних і розрахункових енергетичних характеристик регульованого асинхронного двигуна в статичних і динамічних режимах з використанням методики розрахунку основних втрат в сталі, в якій при поділі питомих втрат на дві складові (гістерезисну і вихрову) вводиться коефіцієнт, що враховує розширення петлі гістерезису внаслідок збільшення частоти напруги живлення. Визначено похибки розрахунків втрат активної потужності, ККД двигуна при розрахунку основних втрат в сталі за пропонованою, а також за традиційною методиками.

Ключові слова: асинхронний двигун, частотне керування, втрати в сталі, втрати на вихрові струми, втрати на гістерезис, коефіцієнт розширення петлі гістерезису.

Проведено сопоставление экспериментальных и расчётных энергетических характеристик регулируемого асинхронного двигателя в статических и динамических режимах с использованием методики расчета основных потерь в стали, в которой при разделении удельных потерь на две составляющие (гистерезисную и вихревую) вводится коэффициент, учитывающий расширение петли гистерезиса вследствие увеличения частоты питающего напряжения. Определены погрешности расчетов потерь активной мощности, КПД двигателя при расчете основных потерь в стали по предлагаемой, а также по традиционной методикам.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотное управление, потери в стали, потери на вихревые токи, потери на гистерезис, коэффициент расширения петли гистерезиса.

The experimental and calculated power characteristics of a regulated asynchronous motor are compared in static and dynamic modes using the calculation technique for the main losses in steel, in which, when the specific losses are divided into two components (the hysteresis and eddy), a factor is introduced that takes into account the expansion of the hysteresis loop due to an increase in the frequency of the supply voltage. The errors in calculating the losses of active power, the efficiency of the engine in calculating the main losses in steel according to the proposed, as well as traditional methods, are determined.

Keywords: induction motor, frequency control, iron loss, eddy current losses, hysteresis losses, expansion coefficient of the hysteresis loop.

Введение. Основные потери в стали для двигателей общепромышленного исполнения могут составлять более 20 % полных потерь номинального режима и более 50 % полных потерь холостого хода [1]. При питании двигателей от полупроводниковых преобразователей магнитные потери дополнительно увеличиваются на 5−10 % [2] и уточнение расчета основных потерь в стали регулируемых асинхронных двигателей (РАД) является актуальной задачей. В работах [2, 3] выполняется анализ работы РАД с учетом активного сопротивления ветви намагничивания, соответствующего потерям в стали магнитопровода, определяемого традиционным методом.

Постановка задачи. Особенностью учета основных потерь в стали частотно-регулируемых асинхронных двигателей (АД) является необходимость их расчета в разных точках диапазона регулирования, характеризующихся различными значениями величин и частот питающего напряжения в соответствии с используемым законом частотного регулирования. Уровень основных потерь в стали зависит от марки и толщины используемой электротехнической стали (ЭТС) и от величины магнитной индукции. Каждому значению магнитной индукции соответствует определенное значение удельных потерь в стали $p_{уд}$ [4].

Можно воспользоваться традиционной методикой определения потерь в стали [5]:

$$P_{\text{ст,осн}} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot (k_{Да} \cdot B_a{}^2 \cdot m_a + k_{Дz} \cdot B_{z1}{}^2 \cdot m_{z1}), \quad (1)$$

где $p_{1,0/50}$ − общие удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, Вт/кг;

β − показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания (β = 1,3−1,5);

$k_{Да}$, $k_{Дz}$ − коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов;

B_a, B_{z1} − индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл;

m_a, m_{z1} − масса стали ярма и зубцов статора, кг;

f − частота перемагничивания, Гц.

В отличие от общепромышленных АД в РАД следует учитывать не только потери в магнитопроводе статора, но и в магнитопроводе ротора. Это связано с тем, что при глубоком регулировании частота перемагничивания ротора может иметь существенные значения.

Возможно разделение удельных потерь в стали на две составляющие:

− вихревую

$$p_{\text{вх}_{1,0/50}} = \frac{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot \Delta^2}{24\rho\gamma}, \quad (2)$$

где Δ − толщина стального листа, мм;

ρ − удельное электрическое сопротивление стали, Ом·мм^2/м;

γ − плотность стали, кг/м^3;

− гистерезисную $p_{\text{гс}}$. В справочной литературе представлены только общие удельные потери в стали,

© Р.Н. Еноктаев, 2018

а удельные потери на гистерезис при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц определяются следующим образом:

$$p_{\text{гс}_{1,0/50}} = p_{1,0/50} - p_{\text{вх}_{1,0/50}}. \quad (3)$$

За счет этого разделения при определении основных потерь в стали при частотах отличных от базовых введением коэффициента k_P учитывается расширение петли гистерезиса. Определение коэффициента основывалось на обработке экспериментальных данных, исходя из рис. 1. Аналогичное расширение петель гистерезиса наблюдается и в других марках ЭТС [6, 7].

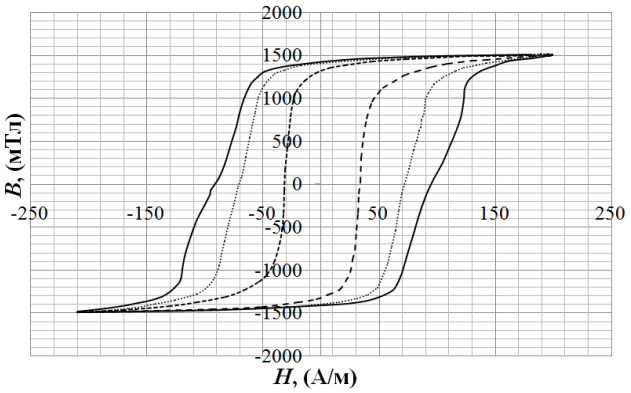


Рис. 1 – Семейство петель гистерезиса для листа ЭТС марки М5Т23 толщиной 0,23мм: — — 100 Гц; • • • • 400 Гц; ▬ 600 Гц

Тогда выражение для расчета основных потерь в стали выглядит следующим образом:

$$P_{\text{ст,осн}} = (p_{\text{вх}_{1,0/50}} \left(\frac{f}{50}\right)^2 + p_{\text{гс}_{1,0/50}} \left(\frac{f}{50}\right) \cdot k_P) \times \times (k_{Да} \cdot B_a^{\,2} \cdot m_a + k_{Дz} \cdot B_{z1}^{\,2} \cdot m_{z1}). \quad (4)$$

Целесообразно проанализировать с какими погрешностями рассчитываются характеристики АД в статических и динамических режимах при разделении удельных потерь на две составляющие, а также введении коэффициента, учитывающего расширение петли гистерезиса.

Основные соотношения для РАД при различных законах частотного управления могут быть получены при использовании Т-образной эквивалентной схемы замещения двигателя с изменяющимися при частотном управлении параметрами (см. рис.2).

При использовании преобразователей частоты (ПЧ) – источников регулируемого напряжения величина приложенного к двигателю напряжения оценивается относительной величиной $\gamma = U_1/U_{1N}$ – отношением текущего и номинального напряжений питания двигателя. В этой схеме все сопротивления, за исключением активных сопротивлений обмоток статора r_1 и ротора r_2', изменяются пропорционально параметру регулирования $\alpha = f_1 / f_{1N}$, где f_1 и f_{1N} – текущее и номинальное значения частоты преобразователя соответственно [8]. Взаимосвязанное управление напряжением и частотой преобразователя, задаваемое законом частотного управления, при законах первого уровня определяется соотношениями: $\gamma = \alpha$, при $U/f = \text{const}$, $\gamma = \alpha^2$ при $U/f^2 = \text{const}$ и т. д. Приведенное активное сопротивление, эквивалентное нагрузке на валу двигателя, зависит от параметра регулирования α и параметра абсолютного скольжения $\beta = f_2 / f_{1N} = \alpha \cdot s$, где f_2 – частота тока ротора, s – его скольжение.

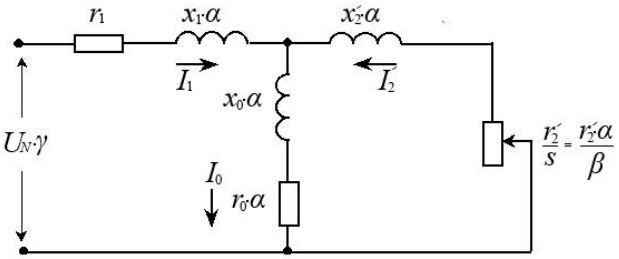


Рис. 2 – Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя с изменяющимися при частотном управлении параметрами

При оценке энергоэффективности используется среднедиапазонный КПД [10], отражающий энергетику РАД во всем диапазоне регулирования от n_1 до n_2:

$$\eta_{\text{сдАД}} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \eta_{\text{АД}}(n) \cdot dn. \quad (5)$$

Математические модели, используемые для исследования переходных электромагнитных и электромеханических процессов в РАД, основаны на системах нелинейных дифференциальных уравнений равновесия напряжений и токов в системе преобразованных координат, что подробно описано в [8].

Материалы и результаты исследований. С помощью програмного продукта DIMASDrive [9], разработанного на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета, обеспечивается моделирование с использованием традиционной и предлагаемой методик расчета основных потерь в стали.

Рассмотрен наиболее распространенный привод с транзисторным ПЧ с автономным инвертором напряжения и ШИМ-регулированием при законе частотного управления $U/f = \text{const}$. Транзисторный частотный преобразователь Altivar 28 Telemecanique обеспечивал питание асинхронного двигателя АИР71А2. Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 380 В. Преобразователь имел следующие настройки: $U_N = 220$ В и $f_N = 50$ Гц, частота модуляции 4 кГц. В результате теоретических и экспериментальных исследований получены характеристики для параметров регулирования 30 и 50 Гц. В процессе эксперимента осциллографировались токи и напряжения с помощью устройства BORDO-421 и затем, с использованием разработанной на базе MATLAB программы «Обработка результатов», было

произведено построение в функции времени кривых изменения анализируемых переменных.

На рис. 3, 4 представлены зависимости потерь двигателя от момента.

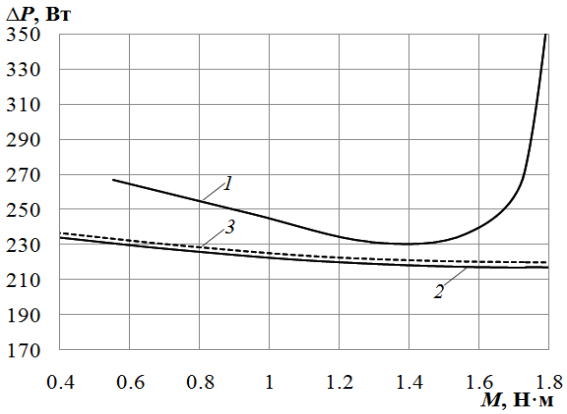


Рис. 3 – Изменение суммарных потерь двигателя при частоте 30 Гц: *1* – эксперимент; *2* – моделирование с использованием традиционной методики расчета потерь в стали; *3* – моделирование с использованием предлагаемой методики расчета потерь в стали

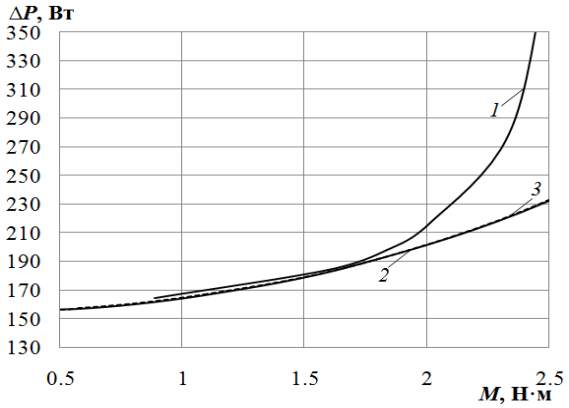


Рис. 4 – Изменение суммарных потерь двигателя при частоте 50 Гц: *1* – эксперимент; *2* – моделирование с использованием традиционной методики расчета потерь в стали; *3* – моделирование с использованием предлагаемой методики расчета потерь в стали

В табл.1 приведено значение среднедиапазонного КПД. В рассматриваемом случае выбран диапазон 1725−2890 об/мин, что соответствует изменению частоты питающего двигатель напряжения от 30 Гц до 50 Гц.

Таблица 1 – Среднедиапазонный энергетический показатель

Показатель	*Методика*		*Эксперимент*
	традиционная	*предлагаемая*	
$\eta_{сдАД}$, %	69,79	69,56	63,90

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования динамических характеристик двигателя АИР71А2, при работе на заданную тахограмму (2,6 с – 1792 об/мин; 2,9 с – 2932 об/мин).

Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от частоты вращения, что описывалось уравнением $M(n) = 0{,}2 + 0{,}825 \cdot n \cdot 10^{-3}$. На рис. 5 представлены результаты теоретического (по разным методикам) и экспериментального исследований.

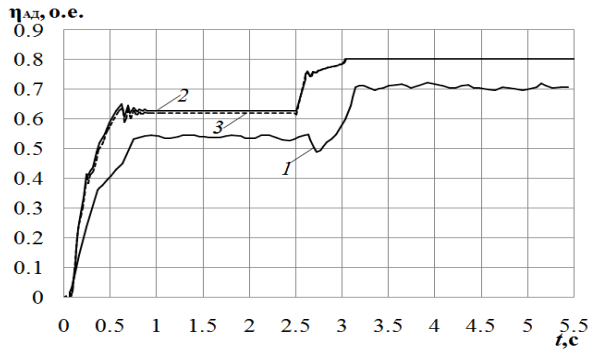


Рис.5 – Зависимости КПД двигателя: *1* – эксперимент; *2* – моделирование с использованием традиционной методики расчета потерь в стали; *3* – моделирование с использованием предлагаемой методики расчета потерь в стали

Выводы.

1. Зависимости суммарных потерь двигателя и соответственно КПД двигателя различны с использованием традиционной и предлагаемой методик расчета основных потерь в стали.

2. Выявлено увеличение погрешностей определения суммарных потерь двигателя при моделировании с использованием традиционной методики расчета основных потерь в стали (при частоте 30 Гц средняя погрешность 9,26 % в диапазоне изменения момента нагрузки 0,6–1,6 Н·м) по сравнению с использованием предлагаемой методики расчета основных потерь в стали (средняя погрешность 7,56 % в диапазоне изменения момента нагрузки 0,6–1,6 Н·м).

3. Наблюдается близость значений суммарных потерь двигателя при теоретических исследованиях на 50 Гц (см. рис. 4), вследствие того, что при номинальной частоте питающего двигатель напряжения коэффициент расширения петли гистерезиса равен 1.

4. Введение коэффициента расширения петли гистерезиса имеет бóльшее влияние на характеристики АД при частотах питания двигателя, отличных от номинальных.

5. Вышеприведенные погрешности существенно снижаются при проведении расчетов с учетом пространственно-временных гармонических составляющих [10].

6. Аналогичные результаты получены при анализе динамических режимов.

7. Энергетические показатели работы РАД уточняются при использовании предлагаемой методики расчета основных потерь в стали.

Список литературы

1. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
2. Семыкина И. Ю. К вопросу о математическом описании потерь в стали электродвигателей переменного тока / И. Ю. Семыкина

// Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №.5. – С.26.
3. Петрушин В.С. Уточнения характеристик регулируемых асинхронных двигателей при учете активного сопротивления ветви намагничивания / В.С. Петрушин, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев // Науково-практичий журнал «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – 2017. – №25 (101). – С. 118-124.
4. ГОСТ 21427.2-83 Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия (с Изменениями N 1-5) Постановление Госстандарта СССР от 21.06.1983 N 2610ГОСТ от 21.06.1983 N 21427.2-83. – Режим доступа: http://metall-rodon.ru/gost/g21427.2-83.pdf. – Дата обращения: 05 сентября 2017.
5. Копылов И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2000. – 607 с.
6. S. Motoaşcă. Improved evaluation of losses in soft magnetic materials / S. Motoaşcă, E. Helerea, I.D. Oltean, G. Scutaru // Bulletin of the Transilvania University of Braşov . – 2009. – vol. 2 (51).
7. Петрушин В.С. К особенностям расчета основных потерь в стали в асинхронных двигателях / В.С. Петрушин, В.П. Чайковский, Р.Н. Еноктаев // Науково-практичий журнал «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – 2017. – №24 (101). – С. 46-50.
8. Петрушин В.С. Учебное пособие «Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе» / В.С. Петрушин // Одесса, Наука и техника. –2006. – 320 с.
9. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт «DIMASDrive». Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). Киев: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.
10. Петрушин В.С. Учет потерь от высших гармонических в регулируемых асинхронных двигателях / В.С. Петрушин, Р.Н. Еноктаев, О.И. Шестаков, Н.С. Прокопенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2017. – №1 (1223). – С. 101-105.

Reference (transliterated)

1. Braslavskii I. Ia., Ishmatov Z. Sh., Poliakov V. N. *Energosberegaiushchii asinkhronnyi elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric]. Academy Publ. Moscow. 2004, 256 p.
2. Semykina I. Iu. K voprosu o matematicheskom opisanii poter' v stali elektrodvigatelei peremennogo toka [On the question of the mathematical description of the iron loss of AC motors], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*. 2013, no.6, pp. 26.
3. Petrushin V.S., Plotkin Iu.R., Enoktaev R.N. Utochneniia kharakteristik reguliruemykh asinkhronnykh dvigatelei pri uchete aktivnogo soprotivleniia vetvi namagnichivaniia [Specification of the characteristics of adjustable asynchronous motors when taking into account the active resistance of the magnetization branch]. *Naukovo-praktichii zhurnal «Elektrotekhnichni ta komp'iuterni sistemi»*. 2017, no.25 (101), pp. 118-124.
4. GOST 21427.2-83. Stal' elektrotekhnicheskaia kholodnokatanaia izotropnaia tonkolistovaia. Tekhnicheskie usloviia (s Izmeneniiami N 1-5) Postanovlenie Gosstandarta SSSR ot 21.06.1983, N 2610GOST ot 21.06.1983 N 21427.2-83 [Electrical steel cold-rolled isotropic. Specifications (Amended N 1-5) Resolution of the State Standard of the USSR 21.06.1983 N 2610GOST from 21.0 6.1983 N 21427.2-83].
5. Kopylov I. P. *Elektricheskie mashiny* [*Electric cars*]. Vysshaia shkola Publ. 2010, Moscow. 607 p.
6. S. Motoaşcă, E. Helerea, I.D. Oltean, G. Scutaru. Improved evaluation of losses in soft magnetic materials. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov* . 2009, no 2 (51).
7. Petrushin V.S., Chaikovskii V.P., Enoktaev R.N. K osobennostiam rascheta osnovnykh poter' v stali v asinkhronnykh dvigateliakh [The special features of the calculation of basic iron losses in asynchronous motor]. *Naukovo-praktichii zhurnal "Elektrotekhnichni ta komp'iuterni sistemi*. 2017, no.24, (101), pp. 46-50.
8. Petrushin V.S. *Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode* [Induction motors in the regulated electric drive]. Science and Technology Publ. Odessa. 2006, 320 p.
9. Petrushin V.S., Rjabinin S.V. and Iakimets' A.M. Programmnyj produkt «DIMASDrive». Programma analiza raboty, vybora i proektirovanija asinhronnyh korotkozamknutyh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektro-privoda [«DIMASDrive» software product. program performance analysis, selection and design of asynchronous motors short-regulated electric drive systems]. Patent UA, no. 4065. CD.
10. V.S. Petrushin, R.N. Enoktaev, O.I. Shestakov, N.S. Prokopenko. Uchet poter' ot vysshikh garmonicheskikh v reguliruemykh asinkhronnykh dvigateliakh [Allowance for loss of the higher harmonic in the controlled induction motors]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Seriia : Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorennia energiï*. 2017, no 1(1223), pp. 101-105.

Поступила (received) 19.02.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Коригування розрахунку основних втрат у сталі в регульованих асинхронних двигунах / Р.М. Єноктаєв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія**: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії».** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – №5 (1281). – С. 55–58. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Корректировка расчета основных потерь в стали в регулируемых асинхронных двигателях / Р. Н. Еноктаев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія**: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії».** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – №5 (1281). – С. 55–58. Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Correction of the calculation of the main losses in steel in controlled induction motor / R.N. **Yenoktaiev //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 55–58. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єноктаєв Ростислав Миколайович, аспірант Одеського національного політехнічного університета, 65044, Одеса, проспект Шевченка, 1, ОНПУ, тел. (097)046-30-70; e-mail: rostik-enok@ukr.net

Еноктаев Ростислав Николаевич, аспирант Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (097)046-30-70; e-mail: rostik-enok@ukr.net

Yenoktaiev Rostislav Nikolaievich, postgraduate at the Department of Electric Cars, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av., 1, ONPU, ph. (097)046-30-70; e-mail: rostik-enok@ukr.net

УДК 621.313:536.2.24:539.2

В. Ф. БОЛЮХ, А. И. КОЧЕРГА, И. С. ЩУКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УДАРНО-СИЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ

З використанням математичної моделі показано, що в комбінованих лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачах (ЛІЕП) ударно-силової дії максимальна величина та імпульс результуючої силової електродинамічної та електромагнітної дії вищі, ніж у ЛІЕП індукційного, електродинамічного та електромагнітного типу. Найменша густина струму в індукторі спостерігається у ЛІЕП електромагнітного типу, найвищі силові показники створює комбінований ЛІЕП електромагнітно-електродинамічного типу, найменші значення індукції магнітного поля розсіювання виникають в комбінованому ЛІЕП електромагнітно-індукційно-електродинамічного типу. Встановлено, що найбільш ефективним являється комбінований ЛІЕП електромагнітно-індукційно-електродинамічного типу з паралельним з'єднанням індуктора та котушкового якоря.

Ключові слова: лінійний ударний електромеханічний перетворювач, комбінований перетворювач ударно-силової дії, електропровідний якір, котушковий якір, феромагнітний якір, критерій ефективності.

С использованием математической модели показано, что в комбинированных линейных импульсных электромеханических преобразователях (ЛИЭП) ударно-силового действия максимальная величина и импульс результирующего силового электродинамического и электромагнитного воздействия выше, чем в ЛИЭП индукционного, электродинамического и электромагнитного типа. Наименьшая плотность тока в индукторе наблюдается в ЛИЭП электромагнитного типа, наивысшие силовые показатели развивает комбинированный ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа, наиболее низкие значения индукции магнитного поля рассеяния возникают в комбинированном ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа. Установлено, что наиболее эффективным является комбинированный ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и катушечного якоря.

Ключевые слова: линейный ударный электромеханический преобразователь, комбинированный преобразователь ударно-силового действия, электропроводящий якорь, катушечный якорь, ферромагнитный якорь, критерий эффективности.

Purpose. Evaluation and comparison of the efficiency of various combined linear pulse electromechanical converters (LPEC) of impact-force action with regard to electrical, power and environmental indicators. **Methodology**. A mathematical model is developed and implemented in the software package Comsol Multiphysics, which describes the spatio-temporal electromagnetic and electromechanical processes of combined shock-power LIEP. Using the efficiency criterion, which takes into account the electric, power and field indicators in a relative manner, a comparative analysis of various LPEC. **Results**. It has been established that in the combined LPEC of electromagnetic-induction type, LPEC of electromagnetic-electrodynamic type and LPEC of electromagnetic-induction-electrodynamic type, the maximum magnitude and impulse of the resultant force action is higher than for LPEC of induction, electrodynamic and electromagnetic types. **Originality**. Using the mathematical model, it is shown that in the combined LPEC of shock-force action the maximum value of the resulting power electrodynamic and electromagnetic action is higher than in the LPEC of induction, electrodynamic and electromagnetic type. The lowest current density in the inductor is observed in the LPEC of the electromagnetic type, the best power indicators are developed by the combined LPEC of electromagnetic-electrodynamic type, the lowest values of the induction of the magnetic scattering field appear in the combined LPEC of electromagnetically-induction-electrodynamic type. **Practical value.** For all variants of the evaluation strategy, the most effective is the combined LPEC of electromagnetic-induction-electrodynamic type with a parallel connection of the inductor and the coil armature, and the worst is the electromagnetic-type LPEC.

Keywords: linear pulse electromechanical converters, combined shock-force converter, electroconductive anchor, coil anchor, ferromagnetic anchor, efficiency criterion.

Введение. Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП), которые обеспечивают мощные силовые импульсы, широко используются во многих отраслях науки и техники в качестве устройств ударно-силового действия [1−3].

В строительстве применяются электромагнитные молоты и перфораторы, устройства для забивания свай и анкеров; в горной промышленности – бутобои, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке – вибросейсмоисточники; в машиностроении – прессы с большим диапазоном энергии удара; в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители и дозаторы. Такие преобразователи используются в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки. ЛИЭП ударно-силового действия применяются в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов, уничтожения информации на цифровых носителях и др. [4, 5].

Особенностью ЛИЭП ударно-силового действия является то, что они работают с коротким рабочим циклом и ударной нагрузкой, которая многократно превышает нагрузку традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия. Основными типами ЛИЭП, которые находят наибольшее применение в различных устройствах и системах, являются индукционный, электродинамический и электромагнитный [3, 6]. В этих преобразователях происходит электромагнитное взаимодействие подвижного якоря с неподвижным индуктором, возбуждаемым от импульсного источника, как правило, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). Отличие в основных типах ЛИЭП состоит в конструкции якоря, который обеспечивает передачу силового воздействия на ударный исполнительный элемент.

В ЛИЭП индукционного типа электропроводящий якорь (ЭЯ) представляет собой относительно тонкий диск, в котором индуцируются вихревые токи от индуктора, вследствие чего между ними возникает электродинамическая сила отталкивания.

В ЛИЭП электродинамического типа катушечный якорь (КЯ) представляет собой многовитковую обмотку, которая последовательно или параллельно соединяется с индуктором. Направление токов в КЯ и индукторе таково, что между ними возникает электродинамическая сила отталкивания.

В ЛИЭП электромагнитного типа ферромагнитный якорь (ФЯ) представляет собой относительно толстый

диск, на который действует электромагнитная сила притяжения со стороны индуктора. Для уменьшения вихревых токов ФЯ целесообразно выполнять с радиальными разрезами.

Основные типы ЛИЭП обеспечивают различные силовые показатели, создавая различные индукции магнитных полей рассеяния в окружающее пространство, что сказывается на их экологических показателях. Они имеют различные величины тока возбуждения индуктора, что важно для электронной системы возбуждения. Однако эффективность ЛИЭП основных типов недостаточно высока [7].

Одним из путей совершенствования ударно-силовых устройств является разработка комбинированных ЛИЭП, объединяющих якоря преобразователей основных типов [8]. В комбинированном ЛИЭП коаксиальной конфигурации ФЯ располагается с одной стороны неподвижного индуктора, а ЭЯ и КЯ – с противоположной стороны. В таком случае можно обеспечить однонаправленное действие электродинамических и электромагнитных сил на объект воздействия. При этом возникает вопрос об эффективности различных комбинированных ЛИЭП ударно-силового действия при учете различных показателей их работы.

Постановка задачи. Необходимо оценить и сравнить эффективность различных комбинированных ЛИЭП ударно-силового действия при учете электрических, силовых и экологических показателей.

Математическая модель ЛИЭП. В ЛИЭП ударно-силового действия при возбуждении индуктора от ЕНЭ возникают быстропротекающие электромагнитные и механические процессы. Реализация математической модели ЛИЭП с использованием теории электрических цепей не позволяет в полной мере описать совокупность пространственно-временных процессов [9, 10]. Исходя из этого, разработана математическая модель ЛИЭП, которая основана на методе конечных элементов.

Поскольку рассматриваемые ЛИЭП имеют осевую симметрию, то целесообразно использовать двухмерную математическую модель с пространственно-распределенными параметрами [11]. Для определения электромагнитных параметров ЛИЭП в цилиндрической системе координат $\{r, z\}$ рассчитывается векторный магнитный потенциал A из уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r\mu(B)}\frac{\partial(rA)}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\mu(B)}\frac{\partial A}{\partial z}\right)+\sigma_m\frac{\partial A}{\partial t}=j_m, \quad (1)$$

где $\mu(B)$ – магнитная проницаемость, зависящая от индукции магнитного поля B для ФЯ; σ_m – электропроводность m-го активного элемента; j_m – плотность тока в m-ом активном элементе; m=1, 2, 3 – индексы индуктора, ЭЯ и ФЯ соответственно.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z=\frac{1}{r}\frac{\partial(rA)}{\partial r};\ B_r=-\frac{\partial A}{\partial z}. \quad (2)$$

Граничным условием системы выступает уравнение

$$\bar{n}\times A=0, \quad (3)$$

где $\bar{n}$ – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Для ФЯ используется нелинейная кривая намагничивания $B=f(H)$. Ток в индукторе i_1 (без КЯ) описывается системой уравнений:

$$\left(R_e+R_1\right)\cdot i_1+L_e\frac{di_1}{dt}+\frac{1}{C}\int i_1dt+\frac{N_1}{s}\int_V\frac{dA_l}{dt}dv=0;$$

$$\frac{1}{C}\int_0^t i_1\cdot dt=U_0, \quad (4)$$

где R_e – активное сопротивление внешней цепи; R_1 – активное сопротивление индуктора; L_e – индуктивность внешней цепи; U_0 – напряжение заряда ЕНЭ; C – емкость ЕНЭ; N_1 – число витков индуктора; s – площадь поперечного сечения индуктора, пронизываемая магнитным потоком; A_l – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; V – объем индуктора.

Аксиальные электродинамические силы, действующие на КЯ и ЭЯ, и электромагнитные силы, действующие на ФЯ, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

$$f_z=0{,}5\oint_S\left[\bar{H}\left(\bar{B}\cdot\bar{n}\right)+\bar{B}\left(\bar{H}\cdot\bar{n}\right)-\bar{n}\left(\bar{H}\cdot\bar{B}\right)\right]ds, \quad (5)$$

где S – площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря.

Импульс аксиальных электродинамических (электромагнитных) сил, определяющий интегральное силовое воздействие на соответствующий якорь, описывается выражением:

$$F_z=\int_0^t f_z dt. \quad (6)$$

Для определения температуры активных элементов, влияющей на их активные сопротивления, используется полевая модель, которая позволяет на каждом временном шаге учитывать пространственные распределения температур в активных элементах ЛИЭП [12]:

$$c_m(T)\gamma_m\frac{\partial T_m}{\partial t}=\lambda_m(T)\left(\frac{\partial^2T_m}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T_m}{\partial r}+\frac{\partial^2T_m}{\partial z^2}\right)+j_m^2k_z\rho_m(T);$$

$$c_k(T)\gamma_k\frac{\partial T_k}{\partial t}=\lambda_k(T)\left(\frac{\partial^2T_k}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T_k}{\partial r}+\frac{\partial^2T_k}{\partial z^2}\right), \quad (7)$$

где $c(T)$ − усредненная удельная теплоемкость; γ − усредненная плотность материала; j_m − плотность тока m-го элемента; $\lambda(T)$ − коэффициент теплопроводности; k_z − коэффициент заполнения; ρ_mT) − удельное сопротивление m-го элемента.

Эта система уравнений дополняется граничными условиями на поверхностях ξ. На охлаждаемых

поверхностях используются граничные условия третьего рода, описывающие процесс теплоотдачи:

$$-\frac{\partial T_\xi}{\partial n}=\frac{\alpha}{\lambda}\left(T_\xi-T_0\right), \qquad (8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; n – нормаль к поверхности.

На границе контакта элементов ЛИЭП – граничные условия четвертого рода:

$$T_m(r_\xi,z_\xi,t)=T_k(r_\xi,z_\xi,t)\ ;\ \lambda_m\frac{\partial T_{m\xi}}{\partial n}=\lambda_m\frac{\partial T_{k\xi}}{\partial n}. \qquad (9)$$

На оси симметрии ЛИЭП – граничное условие второго рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_\xi=0. \qquad (10)$$

Уравнения (1) – (10) описывают электромагнитные и электромеханические процессы в ЛИЭП при начальных условиях: $u_c(0)=U_0$; $i_1(0)=0$, где u_c – напряжение ЕНЭ.

При расчете предполагаем отсутствие механических перемещений и деформаций элементов, строго аксиальное расположение якорей относительно индуктора и отсутствие вихревых токов в ФЯ.

Решение системы (1)–(10) получаем с использованием метода конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира при интегрировании по времени. Для решения поставленной задачи была разработана компьютерная модель ЛИЭП в программном пакете *Comsol Multiphysics*, который позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [13]. Расчетный шаг по времени автоматически варьировался в зависимости от условий сходимости и показателей погрешности полученных решений. Решение системы уравнений производится методом BDF (*backward differentiation formula*) с фиксированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO.

Исходные параметры ЛИЭП. Комбинированные ЛИЭП строятся на базе сочетания ряда якорей ЛИЭП основного типа. Рассмотрим комбинированные ЛИЭП коаксиальной конфигурации, элементы которых имеют следующие параметры. Неподвижный индуктор содержит $N_1=46$ витков медной шины сечением $a\times b=1{,}8\times4{,}8$ мм^2 и выполнен с наружным диаметром $D_{ex1}=100$ мм, внутренним диаметром $D_{in1}=10$ мм и высотой $H_1=10$ мм. ЭЯ выполнен в виде медного диска с наружным диаметром $D_{ex2}=100$ мм, внутренним диаметром $D_{in2}=10$ мм и высотой $H_2=3$ мм. КЯ выполнен аналогично индуктору. Дисковый ФЯ выполнен из стали Ст10 с наружным диаметром $D_{ex1}=100$ мм и высотой $H_1=10$ мм. Индуктор возбуждается от ЕНЭ емкостью $C=3000$ мкФ и напряжением $U_0=400$ В полярным апериодическим импульсом (индуктор шунтирован обратным диодом) [5].

Комбинированный ЛИЭП (рис.1 – рис. 3) содержит неподвижный индуктор *1*, ЭЯ *2*, ФЯ *3*, ударный исполнительный элемент *4* и силовой согласующий элемент *5*, передающий силовое воздействие от ФЯ *3* на элемент *4*. При использовании ЛИЭП электродинамического типа неподвижный индуктор 1*i* и КЯ 1*a* могут соединяться последовательно или параллельно.

ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа. На рис. 1*а* представлен комбинированный ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа, у которого индуктор *1* взаимодействует с ЭЯ *2* и ФЯ *3*. На рис. 1*б* представлены распределения плотностей тока j и индукции магнитного поля B в активных элементах ЛИЭП в момент максимума тока в индукторе. На рис. 1*в* представлены электромеханические характеристики данного ЛИЭП. Плотность тока в ЭЯ по сечению распределена неравномерно. Максимальная ее величина имеет место в средней части, обращенной к индуктору. Максимальные значения индукции магнитного поля B возникают в средней части зазора между индуктором и ЭЯ. Кроме того значительная индукция магнитного поля наблюдается во внутренней зоне индуктора.

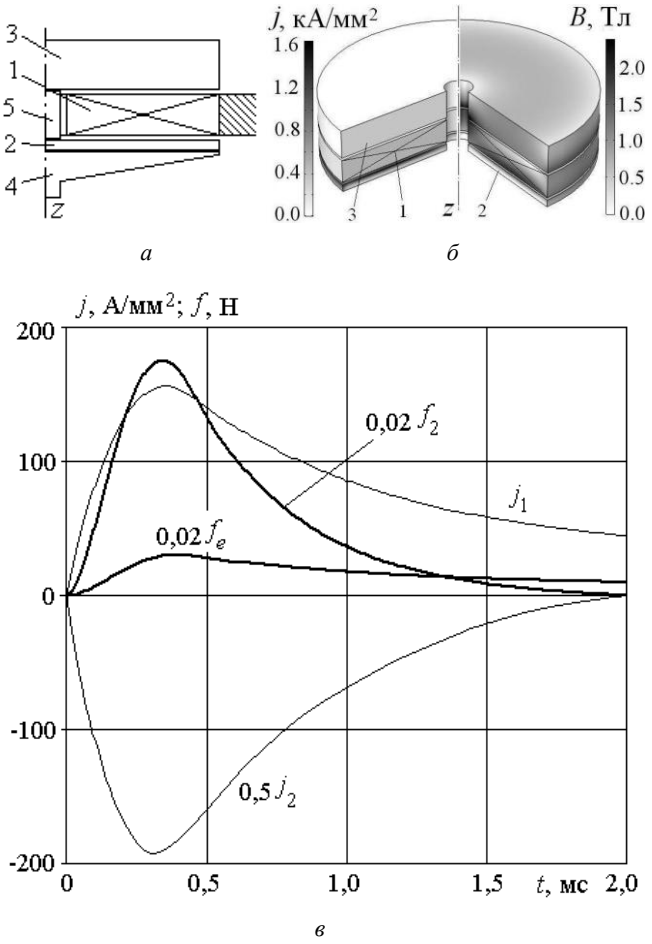


Рис. 1 – Конструктивное исполнение (*а*), распределение плотностей токов и магнитного поля (*б*), электромеханические характеристики (*в*) комбинированного ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа

Изменение плотности тока в индукторе j_1 во времени происходит в форме апериодического полярного импульса с максимальной величиной

156 А/мм^2. Усредненная по сечению плотность тока в ЭЯ j_2 также имеет форму импульса с максимальной величиной 385 А/мм^2. Однако этот импульс через 2 мс меняет полярность.

В начальный момент времени на ЭЯ со стороны индуктора действует электродинамическая сила отталкивания f_2, максимальная величина которой составляет f_{2m}=8,77 кН. Причем эта сила через 2 мс меняет направление воздействия. Электромагнитная сила f_e, действующая на ФЯ со стороны индуктора, все время сохраняет направление воздействия. Однако ее максимальная величина существенно меньше f_{em} = 1,54 кН и затухание этой силы происходит более медленно, чем электродинамической силы f_2.

К концу рабочего процесса импульс электродинамической силы составляет F_2 = 5,42 Н·с, а электромагнитной силы F_e = 3,49 Н·с. Заметим, что максимальная величина результирующего силового воздействия в 1,21 раза выше, чем в ЛИЭП индукционного типа и в 5,65 раз выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. Что касается импульса силы, то здесь ситуация несколько иная. В комбинированном ЛИЭП импульс силы в 1,82 раза выше, чем в ЛИЭП индукционного типа и в 1,22 раза выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. Это свидетельствует о перспективности данного комбинированного ЛИЭП ударно-силового действия.

ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа. На рис. 2*а* представлена конструктивная схема ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа, у которого индуктор *1i* взаимодействует с КЯ *1a* и с ФЯ *3*. В данном преобразователе индуктор и КЯ соединены параллельно. На рис. 2*б* представлены распределения индукции магнитного поля *B* в активных элементах ЛИЭП в момент максимума тока в индукторе. А на рис. 2*в* представлены электромеханические характеристики данного ЛИЭП.

Максимальные значения индукции магнитного поля *B* возникают в средней части зазора между индуктором и КЯ. Причем эта величина индукции превышает аналогичную величину в ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа.

Изменение плотности токов в индукторе и в КЯ j_{1a} во времени происходит в форме апериодического полярного импульса с коротким передним и длинным задним фронтом. При этом максимальные значения плотностей токов в индукторе и КЯ различны: в индукторе j_{1im} = 177,7 А/мм^2, а в КЯ j_{1am} = 204,7 А/мм^2. Меньшее значение плотности тока в индукторе можно объяснить магнитным воздействием на него смежно расположенного ФЯ.

Электромагнитная f_e и электродинамическая f_{1a} силы во времени изменяются так же, как и указанные выше плотности токов. На КЯ со стороны индуктора действует электродинамическая сила отталкивания f_{1a}, максимальная величина которой составляет f_{1am} = 13,03 кН. Электромагнитная сила f_e, действующая на ФЯ со стороны индуктора, значительно меньше и ее максимальная величина составляет лишь f_{em} = 1,19 кН.

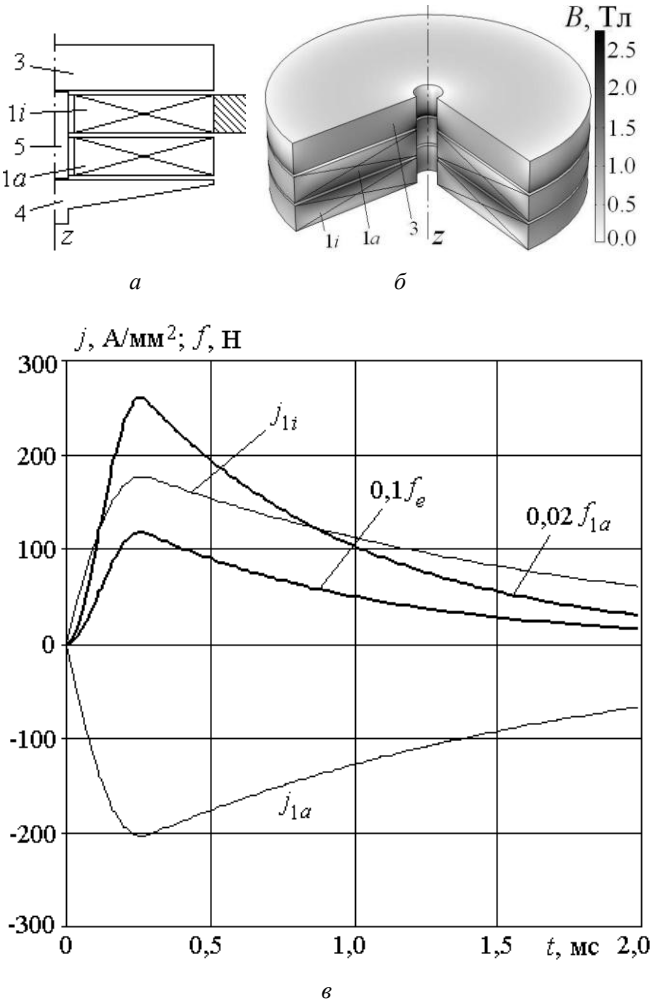


Рис. 2 – Конструктивное исполнение (*а*), распределение магнитного поля (*б*) и электромеханические характеристики (*в*) комбинированного ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа

К концу рабочего процесса импульс электродинамической силы составляет F_{1a} = 12,25 Н·с, а электромагнитной силы F_e = 1,2 Н·с. Заметим, что максимальная величина результирующего силового воздействия в 1,1 раза выше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и в 7,8 раз выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. В комбинированном ЛИЭП импульс силы в 1,21 раза выше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и почти в 2 раза выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа.

ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа. На рис. 3*а* представлена конструктивная схема ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа, у которого индуктор *1i* взаимодействует с ФЯ *3* и с КЯ *1a*, который, в свою очередь, взаимодействует с ЭЯ *2*. В данном преобразователе индуктор и КЯ соединены параллельно. На рис. 3*б* представлены распределения плотностей тока *j* и индукции магнитного поля *B* в активных элементах ЛИЭП в момент максимума тока в

индукторе. На рис. 3*в* представлены электромеханические характеристики данного ЛИЭП.

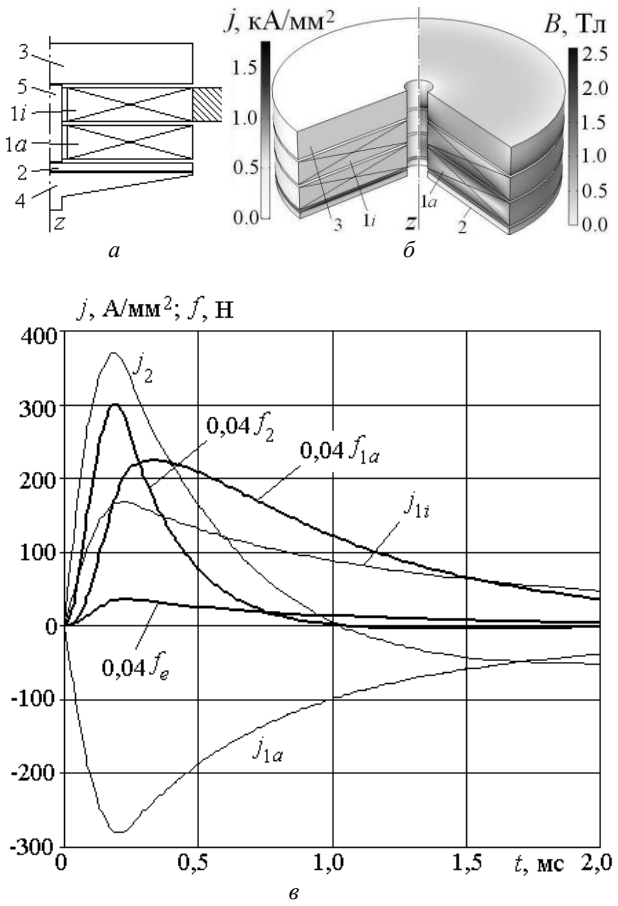


Рис. 3 – Конструктивное исполнение (*а*), распределение плотностей токов и магнитного поля (*б*), электромеханические характеристики (*в*) комбинированного ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа

Наибольшая плотность тока возникает в ЭЯ, а именно, в средней части, обращенной к индуктору. Наибольшие значения индукции магнитного поля возникают в средней части зазора между индуктором и КЯ и между КЯ и ЭЯ. Изменение плотности токов в индукторе j_{1i} и в КЯ j_{1a} во времени происходит в форме апериодического полярного импульса с коротким передним и длинным задним фронтами. При этом максимальные значения плотностей токов в индукторе и якоре различны: в индукторе $j_{1im} = 168{,}8$ А/мм^2, а в КЯ $j_{1am} = 279{,}8$ А/мм^2. Большее значение плотности тока в КЯ можно объяснить магнитным воздействием ФЯ на индуктор и воздействием ЭЯ на КЯ. Максимальная плотность тока в ЭЯ составляет $j_{2m} = 368{,}7$ А/мм^2. Однако ток в ЭЯ после максимального значения уменьшается так быстро, что через 1 мс меняет полярность.

Поскольку полярности токов индуктора и ЭЯ одинаковы, а значит, между ними возникает сила притяжения, то это сказывается на силовых характеристиках данного ЛИЭП. Электромагнитная f_e и электродинамическая f_{1a} силы в течение всего рабочего процесса сохраняют полярности, а электродинамическая сила f_2 после 1 мс практически исчезает. На КЯ со стороны индуктора действует электродинамическая сила отталкивания f_{1a}, максимальная величина которой составляет $f_{1am} = 5{,}58$ кН. Электромагнитная сила f_e, действующая на ФЯ со стороны индуктора, значительно меньше и ее максимальная величина составляет $f_{em} = 0{,}92$ кН. А максимальная величина электродинамической силы, действующей на ЭЯ, составляет $f_{1am} = 7{,}48$ кН.

К концу рабочего процесса импульс электродинамической силы, действующий на КЯ, составляет $F_{1a} = 6{,}59$ Н·с, импульс электромагнитной силы, действующий на ФЯ $F_e = 0{,}89$ Н·с и импульс электродинамической силы, действующий на ЭЯ – $F_2 = 2{,}45$ Н·с.

Заметим, что максимальная величина результирующего силового воздействия в рассматриваемом комбинированном ЛИЭП составляет $f_m = 13{,}12$ кН, что больше аналогичной величины силы любого ЛИЭП основного типа, но меньше, чем у комбинированного ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа. А импульс силы ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа больше, чем в ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов, но меньше, чем в ЛИЭП электродинамического типа.

Анализ эффективности ЛИЭП комбинированного типа. Рассмотрим следующие конструктивные исполнения ЛИЭП: № 1 – индукционного типа; № 2 – электромагнитного типа; № 3 – электродинамического типа с последовательным соединением индуктора и КЯ; № 4 – электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ; № 5 – электромагнитно-индукционного типа (рис. 1); № 6 – электромагнитно-электродинамического типа с последовательным соединением индуктора и КЯ; № 7 – электромагнитно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ (рис. 2); № 8 – электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с последовательным соединением индуктора и КЯ; № 9 – электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ (рис. 3).

В качестве базового варианта используем ЛИЭП электромагнитного типа, поскольку ФЯ присутствует во всех рассмотренных выше комбинированных ЛИЭП. В табл. 1 представлены относительные значения максимальной плотности тока индуктора j_{1m}^*, максимальной величины результирующей силы f_{zm}^*, величины импульса результирующей силы в конце рабочего процесса F_z^* и усредненной индукции магнитного поля рассеяния B_{ex}^* на контуре, расположенном на расстоянии $2D_{ex1}$ от центра индуктора.

Наименьшая плотность тока индуктора наблюдается в ЛИЭП электромагнитного типа (№ 2), а наибольшая – в ЛИЭП электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ (№ 4). Наилучшие силовые показатели развивает

комбинированный ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа (№ 7), а наихудшие силовые показатели развивают ЛИЭП электромагнитного (№ 2) и индукционного (№ 1) типов. Наиболее низкие значения индукции магнитного поля рассеяния возникают в комбинированном ЛИЭП № 9, а наиболее высокие – в ЛИЭП электромагнитного типа (№ 2).

Таблица 1 – Относительные значения показателей ЛИЭП, о.е.

Схема ЛИЭП №	j_{1m}^*	f_{zm}^*	F_z^*	B_{ex}^*
1	2.20	4.65	*0.67*	0.654
2	**1.00**	*1.00*	1.00	*1.000*
3	1.80	3.88	1.01	0.452
4	*2.44*	7.14	1.62	0.252
5	1.87	5.65	1.22	0.457
6	1.63	4.37	1.27	0.270
7	2.12	**7.82**	**1.97**	0.438
8	1.70	4.49	1.22	0.288
9	2.02	7.21	1.44	**0.190**

Для того, чтобы провести всесторонний сравнительный анализ различных комбинированных ЛИЭП, введем критерий эффективности K^*, который в относительном виде учитывает электрические, силовые и полевые (индукция магнитного поля рассеяния) показатели:

$$K^* = \beta\left(\frac{\alpha_1}{j_{1m}^*} + \alpha_2 f_{zm}^* + \alpha_3 F_z^* + \frac{\alpha_4}{B_{ex}^*}\right); \quad \sum_{n=1}^{4}\alpha_n = 1, \quad (11)$$

где β – коэффициент надежности якоря; α_j – весовые коэффициенты показателей ЛИЭП.

Считая, что коэффициент надежности для ЛИЭП без КЯ составляет β=1, на основании экспертных оценок полагаем коэффициент надежности β=0,75 для ЛИЭП с КЯ. Более низкая надежность ЛИЭП с КЯ обусловлена наличием подвижного контакта между индуктором и КЯ, а также его выполнением в виде многовитковой обмотки.

Рассмотрим несколько вариантов стратегии оценки эффективности ЛИЭП (табл. 2). Приоритетность показателя оценивается величиной безразмерного весового коэффициента α_j.

Таблица 2 – Варианты стратегии оценки эффективности ЛИЭП, о.е.

Варианты стратегий	α_1	α_2	α_3	α_4
I	0,25	0,25	0,25	0,25
II	**0,4**	0,2	0,2	0,2
III	0,2	**0,4**	0,2	0,2
IV	0,2	0,2	**0,4**	0,2
V	0,2	0,2	0,2	**0,4**

В табл. 3 в относительном виде представлены значения критериев эффективности K^* конструктивных исполнений ЛИЭП при различных вариантах стратегии оценки их эффективности. Необходимо отметить, что по всем вариантам стратеги оценки наиболее худшим является ЛИЭП электромагнитного типа (№ 2). Более высокие показатели у ЛИЭП электродинамического типа с последовательным соединением индуктора и КЯ (№ 3), а еще более высокие – у ЛИЭП индукционного типа (№ 1). Однако все эти преобразователи уступают по эффективности ЛИЭП комбинированного типа и ЛИЭЛ электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ. По всем вариантам стратегии оценки наиболее эффективным является комбинированный ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ (№ 9).

Таблица 3 – Значения интегральных показателей эффективности K^* ЛИЭП, о.е.

Схема ЛИЭП №	Вариант стратегии				
	I	II	III	IV	V
1	1.827	1.552	2.392	1.595	1.767
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	1.437	1.233	1.731	1.302	1.482
4	2.464	2.033	3.042	2.214	2.567
5	2.397	2.025	3.048	2.161	2.355
6	1.865	1.584	2.147	1.682	2.047
7	2.350	1.951	3.053	2.175	2.223
8	1.832	1.554	2.139	1.649	1.986
9	2.702	2.236	3.243	2.377	2.951

Таким образом, разработка комбинированных ударно-силовых ЛИЭП, использующих элементы ЛИЭП индукционного, электродинамического и электромагнитного типа, открывает широкие возможности по повышению их эффективности.

Выводы.

1. Разработана и реализована в программном пакете *Comsol Multiphysics* математическая модель, которая описывает пространственно-временные электромагнитные и электромеханические процессы комбинированном ЛИЭП ударно-силового действия.

2. В комбинированном ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа максимальная величина результирующего силового воздействия в 1,21 раза выше, чем в ЛИЭП индукционного типа и в 5,65 раз выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. Импульс результирующей силы в 1,82 раза больше, чем в ЛИЭП индукционного типа и в 1,22 раза больше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа.

3. В комбинированном ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа максимальная величина результирующего силового воздействия в 1,1 раза выше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и в 7,8 раз выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. Импульс результирующей силы в 1,21 раза больше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и почти в 2 раза больше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа.

4. В комбинированном ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа,

максимальная величина результирующего силового воздействия составляет 13,12 кН, что выше, чем аналогичная величина любого из ЛИЭП основного типа. Импульс силы данного ЛИЭП больше, чем у ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов, но меньше, чем у ЛИЭП электродинамического типа.

5. Наименьшая плотность тока в индукторе наблюдается в ЛИЭП электромагнитного типа, наивысшие силовые показатели развивает комбинированный ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа, наиболее низкие значения индукции магнитного поля рассеяния возникают в комбинированном ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа.

6. С использованием критерия эффективности, который в относительном виде учитывает электрические, силовые и полевые показатели, установлено, что по всем вариантам стратеги оценки наиболее эффективным является комбинированный ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и катушечного якоря.

Список литературы

1. Balikci A. Improved performance of linear induction launchers / A. Balikci,Z. Zabar, L. Birenbaum // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. - Vol. 41. - № 1. - P. 171–175.

2. Chemerys V.T. Prospectives of new coilgun design development / V.T. Chemerys, V.F. Bolyukh // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. - № 3. – С. 44-52.

3. Bissal A. Comparison of two ultra-fast actuator concept / A. Bissal, J. Magnusson, G. Engdahl // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. - Vol. 48. - № 11. - P. 3315–3318.

4. Young-woo J. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD / J. Young-woo, L. Hyun-wook, L. Seok-won // Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution». - 10-13 June 2013. – Stockholm. - Paper 608.

5. Bolyukh V.F. High-efficiency impact electromechanical converter / V.F. Bolyukh, V.F. Luchuk, M.A. Rassokha, I.S. Shchukin // Russian Electrical Engineering. – 2011. - Vol. 82. - № 2. - P. 104–110.

6. Болюх В.Ф. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Технічна електродинаміка. - 2016. – № 5. – С. 46-48.

7. Болюх В.Ф. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия / В.Ф. Болюх, А.М. Марков, В.Ф. Лучук, И.С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. - № 2. – С. 9-14.

8. Болюх В.Ф. Сравнительный анализ конструктивных схем линейных ударных электромеханических преобразователей комбинированного типа / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. - № 4. – С.20-27.

9. Li W. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method / W. Li, C.S. Koh // 14th biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier. – 2010. - P. 1–9.

10. Lim D.K. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method / D.K. Lim, D.K. Woo, I.W. Kim // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. - Vol. 49. - № 12. - P. 5749–5755.

11. Bolyukh V.F. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction–dynamic converter / V.F. Bolyukh, S.V. Oleksenko // Russian Electrical Engineering. – 2015. - Vol. 86. - № 7. - P. 425–431.

12. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // Russian electrical engineering. – 2012. – Vol. 83, № 10. - P. 571 – 576.

13. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. http://www.comsol.com.

References (transliterated)

1. Balikci A. Zabar Z., Birenbaum L. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no 1, pp. 171–175.
2. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development. *Artilleriyskoye i strelkovoye vooruzheniye – Artillery and small arms*, 2008, no 3, pp. 44-52.
3. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, vol. 48, no.11, pp. 3315–3318.
4. Young-woo J., Hyun-wook L., Seok-won L. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD *Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution»*, 2013, 10-13 June, Stockholm, Paper 608.
5. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, no. 2, pp. 104–110.
6. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Sravnitel'nyy analiz lineynykh impul'snykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley elektromagnitnogo i induktsionnogo tipov [Comparative analysis of linear pulsed electromechanical converters of electromagnetic and induction types]. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 5, pp. 46-48.
7. Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Shchukin I.S. Energeticheskiye protsessy i effektivnost' induktsionno-dinamicheskogo preobrazovatelya udarnogo deystviya [Energy processes and efficiency of an induction-dynamic shock transducer]. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*, 2009, no 2, pp. 9-14.
8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Sravnitel'nyy analiz konstruktivnykh skhem lineynykh udarnykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley kombinirovannogo tipa [Comparative analysis of constructive schemes of linear shock electromechanical converters of combined type]. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*. 2015, no 4, pp.20-27.
9. Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method, *14th biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier*, 2010, pp. 1–9.
10. Lim D.K., Woo D.K., Kim I.W. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol. 49, no. 12, pp. 5749–5755.
11. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction–dynamic converter. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 7, pp. 425–431.
12. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // *Russian Electrical Engineering*, 2012, Vol. 83, no 10. - pp. 571 – 576.
13. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. http://www.comsol.com.

Поступила (received) 27.02.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження комбінованих лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів ударно-силової дії / В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга, І. С. Щукін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія:

"Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 59–66. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2409-9295.

Исследование комбинированных линейных импульсных электромеханических преобразователей ударно-силового действия / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 59–66. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2409-9295.

Investigation of combined linear pulse electromechanical converters of impact-force action / V. F. Bolyukh, A. I. Kocherga, I. S. Shchukin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 59–66. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Болюх Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

Болюх Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры общей электротехники, тел. (057)707-65-14; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

Bolyukh Vladimir Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor of chair of General Electrical Engineering, tel. +38 (057)707-64-27; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

Кочерга Олександр Іванович, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com.

Кочерга Александр Иванович, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры общей электротехники, тел. (057)707-65-14; e-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com.

Kocherga Aleksandr Ivanovych, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student of the Department "General Electrical Engineering", tel. +38 (057)707-64-27, e-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com.

Щукін Ігор Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, (057)707-65-14, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.

Щукин Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: tech@tetra.kharkiv.com

Shchukin Igor Sergeyevich, PhD in Technical Sciences, Assistant professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Assistant professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057)707-65-14; e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.

УДК 621.313

Н. Н ЗАБЛОДСКИЙ, В. Ю. ГРИЦЮК, П. Б. КЛЕНДИЙ, Д. С. СОРОКИН

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ В ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Наведено результати математичного моделювання взаємозв'язаних електромагнітних і теплових процесів в заглибних електромеханічних перетворювачах з магніторідинним заповненням. Отримано механічні характеристики, залежності розподілу магнітної індукції та густини вихрового струму в активній частині заглибного перетворювача. Застосування магнітної рідини в електромеханічних перетворювачах дозволить забезпечити збільшення електромагнітного моменту на 8-10 % за рахунок зниження магнітного опору повітряного зазору, а також поліпшити умови теплообміну з навколишнім середовищем.

Ключові слова: електромеханічний перетворювач, магніторідинне заповнення, масивний ротор, кінцево-елементна модель, магнітна індукція, електромагнітний момент.

Приведены результаты математического моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в погружных электромеханических преобразователях с магнитожидкостным заполнением. Получены механические характеристики, зависимости распределения магнитной индукции и плотности вихревого тока в активной части погружного преобразователя. Применение магнитной жидкости в электромеханических преобразователях позволит обеспечить увеличение электромагнитного момента на 8-10 % за счет снижения магнитного сопротивления воздушного зазора, а также улучшить условия теплообмена с окружающей средой.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, магнитожидкостное заполнение, массивный ротор, конечно-элементная модель, магнитная индукция, электромагнитный момент.

Results of mathematical modeling of interrelated electromagnetic and thermal processes in submersible electromechanical converters with magneto-liquid filling are presented. A number of modifications of submersible electromechanical transducers are performed with the filling of the internal volume with a magnetic fluid serving simultaneously as a sealant agent and a refrigerant. Mechanical characteristics are obtained, the dependences of the distribution of magnetic induction and the density of the eddy current in the active part of the submerged converter. The use of a magnetic fluid in electromechanical converters will provide an increase in the electromagnetic torque by 8-10 % due to a decrease in the magnetic resistance of the air gap, and also improve the conditions for heat exchange with the surrounding medium.

Keywords: electromechanical converter, magnetic-fluid filling, massive rotor, finite element model, the magnetic induction, the electromagnetic torque.

Введение. Магнитная жидкость (МЖ) – коллоидная наносистема, находящаяся в суперпарамагнитном, ферро- или ферримагнитном состояниях. Свойства МЖ определяются совокупностью характеристик входящих в нее компонентов (твердой магнитной фазы, дисперсионной среды и стабилизатора), варьируя которыми можно в довольно широких пределах изменять параметры МЖ [1, 2]. Развитие исследований в этом направлении осуществлялось при рассмотрении процессов релаксации магнитного момента однодоменных частиц и учета их взаимодействия [3-5]. Одним из параметров, исследование которого позволяет провести анализ проявления этих процессов, является магнитная восприимчивость, а особо ценным результатом является экспериментально обнаруженный максимум температурной зависимости восприимчивости. Его наличие в [6] было объяснено потерей ориентационных степеней свободы магнитожестких однодоменных частиц при затвердевании дисперсионной среды. Необходимо подчеркнуть, что в большинстве работ, посвященных этому вопросу, исследовались магнитные жидкости на основе керосина с дисперсными частицами магнетита, переход которых в твердое состояние происходит при очень низких температурах. Исследование динамической магнитной восприимчивости и кривых намагничивания в широком температурном интервале (от 77 до 380 °К) проведено в работе [7]. Ряд модификаций погружных электромеханических преобразователей (ПЭМП) могут выполняться с заполнением внутреннего объема МЖ, служащей одновременно уплотняющим веществом и хладагентом [8]. Характерным для МЖ является наличие эффекта увлечения (перемещения) ее магнитным и электромагнитным полем, в том числе и вращающимся. Это обстоятельство позволяет при использовании МЖ в качестве теплоносителя системы охлаждения, например, асинхронного электродвигателя, исключить специальные нагнетательные устройства, используемые для чисто жидкостных систем охлаждения [9].

Постановка задачи. Целью работы является качественная и количественная оценка применимости магнитной жидкости с фазовым переходом в погружных электромеханических преобразователях для улучшения механических и энергетических характеристик, а также условий теплообмена.

Материал и анализ исследований. Для рассмотрения взят ПЭМП, используемый в технологических процессах анаэробного брожения для перемешивания субстрата. На рис. 1 показана схема размещения ПЭМП в метантенке. В состав оборудования для автоматического управления процессом анаэробного брожения входит ПЭМП *1* для перемешивания субстрата, совмещенный с индукционным нагревателем биомассы и выполненный в виде двух статоров *2*, *3*, расположенных на вертикальной полой оси *4* и подключенных к полупроводниковому преобразователю напряжения (не показан), а также полого ферромагнитного ротора *5*, на котором жестко закреплена шнековая мешалка *6* с полыми лопастями *7*. Внутренняя полость ферромагнитного ротора и лопасти мешалки заполнены МЖ на основе парафина *8*, выполняющей одновременно функции теплоаккумулирующего материала. ПЭМП установлен в теплоизолированный резервуар *9*, который имеет штуцер отвода биогаза *10*, дно *11* и бункер загрузки *12*. Во внутренней полости ПЭМП расположены бесконтактный тахометр *13* и бесконтактный датчик температуры *14* ротора.

© Н.Н. Заблодский, В.Ю. Грицюк, П.Б. Клендий, Д.С. Сорокин, 2018

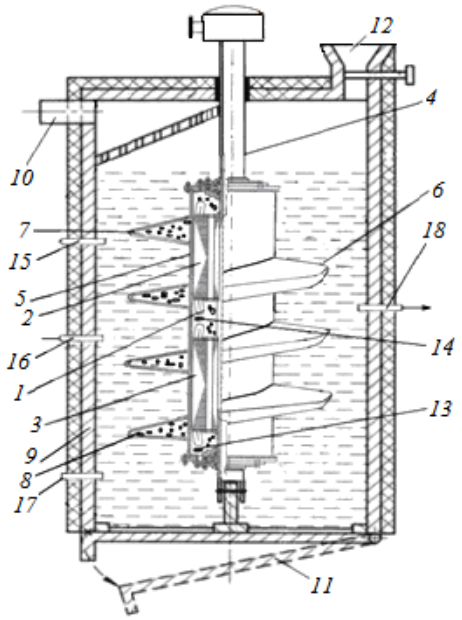


Рис. 1 – Схема размещения ПЭМП в метантенке

В стенках теплоизолированного резервуара вмонтированы первый, второй и третий датчики температуры *15, 16, 17* для измерения температуры субстрата в трех слоях по высоте резервуара, а также датчик окислительно-восстановительного потенциала *18*. Все датчики подключены к контроллеру, а управление полупроводниковым преобразователем напряжения осуществляется с помощью системы фазоимпульсного управления (не показаны).

Биомасса загружается через бункер загрузки *12*. С помощью ПЭМП субстрат смешивается и равномерно прогревается. От источника переменного тока подается питание к полупроводниковому преобразователю напряжения и, в зависимости от сформированного микроконтроллером и системой фазоимпульсного управления закона регулирования, на индукторы *2, 3* подается напряжение соответствующей амплитуды и частоты. Переменные вращающиеся магнитные поля индукторов возбуждают вихревые токи в полом ферромагнитном роторе *6*, осуществляя нагрев последнего, при этом осуществляется запасание тепла в теплоаккумулирующей МЖ, содержащейся в полых лопастях шнековой мешалки и внутренней полости ПЭМП. Одновременно от взаимодействия вращающегося магнитного поля и вихревых токов создается электромагнитный момент, приводящий во вращение полый ферромагнитный ротор и шнековую мешалку *7*. При подключении к обмотке статора *2* трехфазной системи напряжений частотой f_1 образуется вращающееся $2p_Д$ – полюсное магнитное поле $\Phi_Д$, под действием которого в полом ферромагнитном роторе протекают вихревые токи, создается асинхронный момент и ротор вращается с частотой $n_p = n_1(1 - s_Д)$, где $n_1 = \dfrac{60 f_1}{p_Д}$; $s_Д$ – скольжение. Частота токов в роторе $f_{2Д} = f_1 s_Д$. При подключении трехфазной системи напряжений к обмотке статора *3* образуется $2p_Т$ – полюсное магнитное поле, характеризующееся потоком $\Phi_Т$, которое наводит на соответствующем участке полого ферромагнитного ротора ЭДС с частотой

$$f_2 = \left[\frac{p_T}{p_Д}(1 - s_Д) \pm 1\right]. \qquad (1)$$

Знак «+» в (1) соответствует встречному, а «–» – согласованному вращению полей $\Phi_Д$ и $\Phi_Т$. Результирующий момент определяется только электромеханическими и тепловыми процессами:

$$M_{pi} = M_{Дi} + M_{Ti} =$$

$$= \left[\left(i'_{2Д}\right)^2 \cdot \frac{R'_{2Д}}{s_Д} - \left(i'_{2T}\right)^2 \cdot \frac{R'_{2T}}{2 - s_Д}\right] \cdot \frac{m \cdot p}{\omega_{pi}}, \qquad (2)$$

где $i'_{2Д}$, $i'_{2Т}$, $R'_{2Д}$, $R'_{2Т}$, ω_{pi}, – текущие значения наведенного тока и активного сопротивления ротора соответственно для участков каждого из статоров *2, 3*, а также значение угловой скорости полого ферромагнитного ротора; $M_{2Д}$, $M_{2Т}$ – текущие значения электромагнитных моментов, созданных статорами; m, p – соответственно число фаз и число пар полюсов в статорах. В общем случае статоры *2, 3* могут иметь различные значения m и p.

От частоты вихревых токов на соответствующих участках полого ферромагнитного ротора зависит глубина проникновения и энергия электромагнитного поля. Таким образом, становится возможным регулирование скорости, интенсивности тепловыделений, а также осуществление реверсивного режима вращения полого ферромагнитного ротора и, соответственно, шнековой мешалки для создания благоприятных условий анаэробного процесса как в мезофильном, так и в термофильном режимах и увеличение доступной для ферментов удельной площади при механической активации субстрата. На внешней поверхности полого ферромагнитного цилиндра действует также низкочастотное магнитное поле, амплитуда которого может регулироваться в пределах от 25 до 50 мТл, а частота – от 8 до 55 Гц, подачей на статоры *2, 3* квазичастотного напряжения от частотного регулятора. Бактерии наиболее активны в средней зоне. Поэтому содержание резервуара необходимо периодически перемешивать, желательно до шести раз в сутки. Субстрат в резервуаре перемешивают с целью достижения таких эффектов: перемешивание свежего субстрата с перегноем с целью переселения и размножения в новом материале активных бактерий; распределение тепла с целью удержания насколько возможно равномерного распределения температуры в резервуаре; предотвращения или разрушения корки или осадка.

Для контроля и управления параметрами анаэробного брожения в биореакторе одновременно измеряются с помощью бесконтактного тахометра *13*, датчиков *14–18* соответственно скорость вращения шнековой мешалки, температура ротора, температура субстрата в трех слоях по высоте теплоизолированного резервуара, кислотно-щелочной баланс субстрата. Информация от датчиков и тахометра с помощью устройств сопряжения передается в микроконтроллер, в котором в соответствии с заложенной программой с

помощью частотного регулятора происходит управление включением и скоростью вращения ПЭМП, а также передачей дополнительной тепловой энергии путем изменения глубины проникновения вращающегося магнитного поля в полый ферромагнитный ротор и соотношений электромагнитных моментов. Кислотно-щелочной баланс субстрата регулируется изменением интенсивности и частоты магнитного поля на внешней поверхности полого ферромагнитного ротора, а стабильность температурного поля субстрата в паузах между включениями ПЭМП поддерживается за счет тепловой энергии, запасенной теплоаккумулирующим материалом *8*. К ограничивающим условиям отнесена максимальная температура внешней поверхности полого ферромагнитного ротора, которая не должна превышать 60°С по условиям жизнедеятельности метановых анаэробных бактерий.

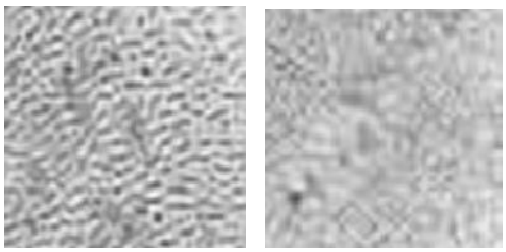
Теплоаккумулирующий материал рекомендуется выбирать с температурой фазового перехода 62–70°С и удельной энтальпией плавления не ниже 200 Дж/г. Программа микроконтроллера предусматривает преобладающее количество включений ПЭМП с повышенной тепловой и механической мощностью только в периоды действия ночного тарифа по электроэнергии. В дневной период, при необходимости включения, потребляемая мощность ПЭМП уменьшается до уровня, который обеспечивает в основном механические потери на перемешивание, а основная часть тепловой энергии покрывается за счет запасенного тепла теплоаккумулирующего материала.

Визуализация движения МЖ в зоне лобовых частей статоров осуществлялась с помощью специальных трассеров в объеме МЖ и видеосъемки через окна в подшипниковых щитах ПЭМП. Круговое движение массива МЖ начинается с некоторым запаздыванием γ во времени от момента включения. При этом γ и частота вращения массива МЖ являются сложными функциями тока статора, скорости магнитного поля, температуры МЖ и направления вращения ротора по отношению к магнитному полю соответствующего статора. При восьмиполюсной магнитной системе статоров, работающих в режиме противовключения, частота вращения массива МЖ составляет 20–22 об/мин, а при питании от тиристорного регулятора напряжения с квазичастотным управлением на рабочей частоте 10 Гц – 4 об/мин. Круговое движение массива МЖ позволяет избежать инконгруэнтного характера плавления, в результате которого происходит расслаивание твердой и жидкой фаз с выпадением в осадок наночастиц, уменьшение энтальпии фазового перехода с ростом числа циклов "плавление-кристаллизация" и снижение эффективности теплообмена. Кроме того, проблема низкой теплопроводности парафина частично решается именно наличием наночастиц МЖ.

Для оценки влияния частоты питающего напряжения на агрегатирование наночастиц с помощью оптического микроскопа проведены наблюдения на тонких слоях МЖ при воздействии вращающегося поля, созданного на физической модели торцевого двухполюсного статора. Амплитудные значения напряженности магнитного поля зафиксированы на уровне 2,6 кА/м. На рис. 2, *а, б* показаны структуры массивов наночастиц при воздействии вращающегося магнитного поля. Экспериментальные исследования показали, что при воздействии вращающегося магнитного поля в МЖ происходит формирование упорядоченных структур, при этом характер возникающих структур зависит от частоты вращающегося поля.

При низких частотах вращающегося поля мелкие массивы выстраиваются по полю перпендикулярно слою, а более крупные формируют сложные волнистые структуры. Увеличение частоты приводит к разбиению массивов на более мелкие, которые ориентированы по направлению поля.

Учитывая то обстоятельство, что в МЖ использован термоаккумулирующий материал, важно провести оценку процессов интенсификации теплообмена ПЭМП и изменения магнитной восприимчивости в циклах "плавление-кристаллизация" МЖ. Анализ температурных зависимостей магнитной восприимчивости образцов МЖ на основе парафина, представленных в работе [7], позволяет утверждать, что особенности изменения магнитной восприимчивости действительно могут быть связаны с затвердеванием основы и блокировкой броуновских степеней свободы магнитожестких частиц.



а *б*

Рис. 2 – Структурные образования массивов наночастиц МЖ при квазичастотном регулировании напряжения с рабочими частотами: *а* – 10 Гц; *б* – 15 Гц

Об этом может свидетельствовать острый экстремум на температурной зависимости магнитной восприимчивости, наблюдающийся при температуре, соответствующей плавлению дисперсионной среды (парафина), при этом максимум смещается в область более высоких температур при увеличении частоты магнитного поля. Таким образом, зоны реальных рабочих температур ПЭМП соответствуют диапазону повышенных значений магнитной восприимчивости МЖ и эффективному ее участию в улучшении магнитной проводимости зазора и области лобовых частей.

Охлаждение магнитной жидкостью, вращающейся совместно с магнитным полем ведет к значительному снижению температуры активных частей ПЭМП в сравнении с внутренним естественным воздушным охлаждением. Представляет интерес использования скрытой теплоты плавления парафиновой основы МЖ в качестве способа интенсификации отвода тепла в погружном ПЭМП. Как известно, в асинхронных двигателях с массивным ротором интенсивного охлаждения требует в первую очередь обмотка статора. В качестве хладоагентов желательно использовать вещества, температура плавления которых находится в

диапазоне 40–90 °С. Это позволяет эффективно осуществлять отвод тепла от обмотки не только за счет скрытой теплоты плавления, но и за счет теплоемкости хладоагента в твердой и жидкой фазах. Нефтяные парафины отличаются от других легкоплавких веществ высокой теплоемкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, инертностью по отношению к контактируемым материалам. Проведенные измерения средних превышений температуры пазовых и лобовых частей статоров при неподвижном роторе показали, что скорость нарастания температуры в лобовых частях в 2,2 раза, а в пазовых – в 1,8 раза меньше для ПЭМП, заполненного МЖ на парафиновой основе, в сравнении с естественным воздушным охлаждением. Поскольку режим работы ПЭМП в биореакторе может быть отнесен кратковременному, то важным параметром является время достижения предельной для выбранного класса нагревостойкости температуры с момента включения напряжения. Результаты тепловых испытаний показали, что время работы ПЭМП в субстрате при мезофильном режиме брожения (40 °С) до допустимого перегрева обмоток статора (115 °С) с заполнением МЖ на основе парафина в 7,5 раз превышает время работы ПЭМП без заполнения МЖ.

Оценку взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов проведем еще на одной модификации погружного ПЭМП с внешним и внутренним массивным ротором.

Для асинхронных машин с массивным ротором учет взаимного влияния электромагнитного и теплового поля является особенно важным [10, 11]. Нагрев массивного ротора приводит к существенному изменению конфигурации токонесущего слоя, к изменению плотности тепловыделений и, соответственно, температуры. В каждой точке ротора удельные потери рассчитываются по выражению

$$Q = J^2 / \gamma(T), \tag{3}$$

где γ – электропроводность материала ротора, зависящая от температуры T по закону

$$\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha(T - T_0)), \tag{4}$$

где γ_0 – электропроводность «холодного» ротора; T_0, T – температура окружающей среды и температура материала ротора; α – температурный коэффициент.

Дифференциальное уравнение теплового поля в частных производных относительно температуры T имеет следующий вид [12, 13]:

$$\lambda \Delta T - cp \frac{\partial T}{\partial t} = Q, \tag{5}$$

где λ, c, p – соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность материала; Q – удельные тепловые потери, рассчитываемые по выражению (3).

В декартовых координатах для двумерной картины поля уравнение (5) переписывается в следующем виде:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - cp \frac{\partial T}{\partial x} = Q. \tag{6}$$

Взаимосвязь уравнений электромагнитного и теплового полей проявляется во взаимном влиянии температуры, электропроводности, плотности вихревых токов и удельных тепловых потерь. Также как и для уравнения электромагнитного поля для уравнения (6) задаются граничные и начальные условия. Выбор граничных условий обусловлен особенностями охлаждения ротора ПЭМП. При построении математической модели предполагается, что основная теплопередача в нагрузочно-охлаждающую среду выделившейся в активных элементах ПЭМП тепловой энергии, осуществляется путем конвективного теплообмена между нагретой поверхностью и нагрузочно-охлаждающей средой в жидком состоянии описывается выражением (7). Подобная теплопередача происходит в соответствии с законом Ньютона-Рихмана [12]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{k}{\lambda}(T - T_0), \tag{7}$$

где k – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура охлаждающего воздуха.

Граничное условие (7) задается на внешних поверхностях ротора. С физической точки зрения наиболее адекватным является предположение о передаче всех выделившихся в роторе джоулевых потерь жидкому материалу в виде теплового потока через поверхность. Кондуктивному теплообмену в твердом состоянии, соответствует граничное условие второго рода, которое задает среднюю величину теплового потока на границах расчетных области ротора

$$\begin{aligned} q_1\big|_{G1} \frac{1}{R_{2i1}} \int_S Q ds &= \frac{1}{R_{2i1}} \int_S \left[J_{z1}^2 / (\gamma) T \right] ds; \\ q_2\big|_{G2} \frac{1}{R_{2i2}} \int_S Q ds &= \frac{1}{R_{2i2}} \int_S \left[J_{z2}^2 / (\gamma) T \right] ds, \end{aligned} \tag{8}$$

где R_{2i1}, R_{2i2} – наружный радиус внешнего и внутреннего ротора; S – область интегрирования.

Для повышения точности математической модели внесены функциональные зависимости температурных коэффициентов активных материалов в зависимости от температуры $\alpha_{steel}(t)$, $\alpha_{cu}(t)$, зависимости магнитной проницаемости электротехнической стали от величины магнитной индукции $\mu(B)$, коэффициентов теплопроводности стали, воздуха, нагрузочно-охлаждающей среды в зависимости от температуры $k_{steel}(t)$, $k_{air}(t)$, $k_{load}(t)$.

Геометрия модели погружного ПЭМП представляет собой четверть поперечного сечения реальной восьмиполюсной конструкции. Конечно-элементная сетка модели представлена на рис. 3. В табл. 1 приведены основные свойства материалов для каждой расчетной области погружного ПЭМП, задаваемые как исходные данные.

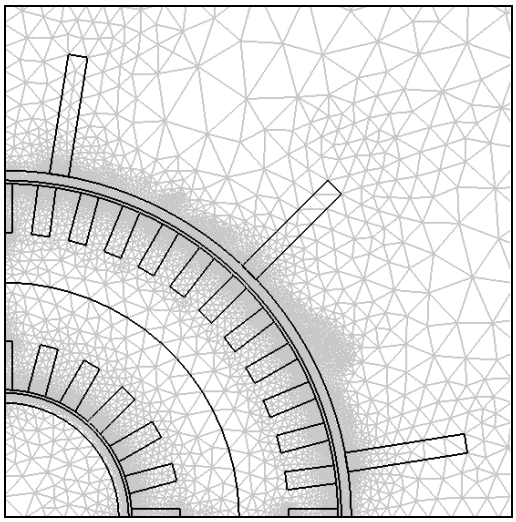


Рис. 3 – Конечно-элементная сетка модели погружного преобразователя

Таблица 1 – Свойства материалов расчетных областей

Область	Относительная магнитная проницаемость, μ_r	Удельная электропроводность $\gamma(T)$, См/м
Магнитопровод статора	Кривая намагничивания Ст. 2013	0
Области, заполненные магнитной жидкостью	8	$2{,}5\cdot10^{-6}$
Массивный ротор	Кривая намагничивания Ст.3	$0{,}5\cdot10^{7}$
Обмотка	1	$5{,}8\cdot10^{7}$

На рис. 4, 5 и 6 представлены результаты моделирования электромагнитного поля погружного ПЭМП с магнитожидкостным заполнением и без заполнения (штриховая линия) в режиме стоянки под током.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в этом режиме магнитное поле проникает на небольшую глубину массива (2–3 мм) со стороны внутренней поверхности наружного и внутреннего цилиндров.

При этом величина индукции в роторе достигает значений 2,1–2,2 Тл. Радиальная линия, вдоль которой построен график распределения нормальной составляющей магнитной индукции (рис. 5) проходит через участок внутреннего ферромагнитного ротора, воздушный зазор, зубцы и ярмо статора, а также через зазор и участок внешнего ротора.

Результатом расчета электромагнитной задачи является величина мощности тепловых потерь, использованная для расчета картины теплового поля погружного преобразователя, а также данные по распределению магнитной индукции и вихревых токов в роторе, использованные для расчёта величины электромагнитного момента.

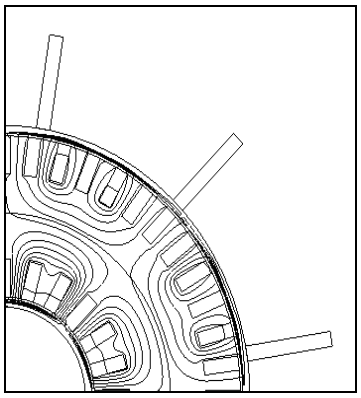


Рис. 4 – Картина распределения нормальной составляющей магнитной индукции и векторного магнитного потенциала в активной части погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением

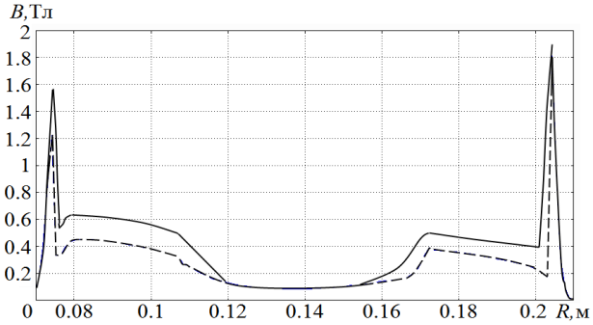


Рис. 5 – Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль радиуса погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения

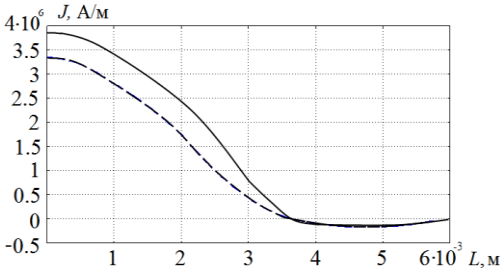


Рис. 6 – Распределение плотности тока по глубине массивного ротора погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения

Картина теплового поля погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением показана на рис. 7. Полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне удельных тепловыделений в активной части погружного преобразователя.

Главными источниками тепловыделений за счет протекающих вихревых токов являются внешний и внутренний цилиндры ферромагнитного ротора. Температура на их поверхности в режиме стоянки под током достигает значения 160–170 °С. Температура разогреваемой среды вблизи поверхности ротора – 145–155 °С.

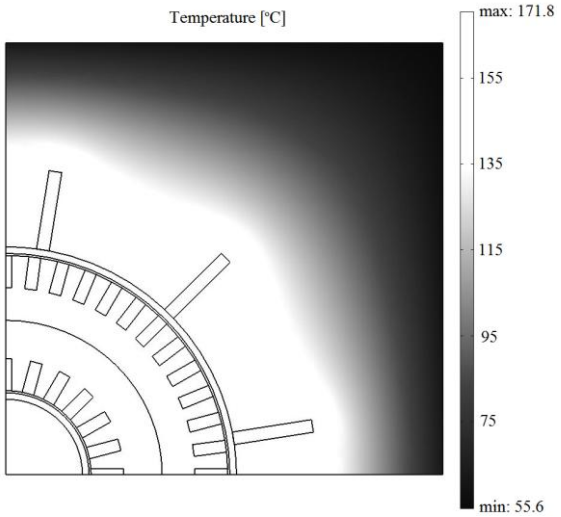


Рис. 7 – Картина теплового поля погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением

В соответствии с методом тензора магнитного натяжения, для определения электромагнитного момента, приложенного к ротору ПЭМП, последний следует охватить поверхностью *S*, расположенной в немагнитной среде на бесконечно малом расстоянии от ротора и ограничивающей его объем *V* [14].

Под силой натяжения T_n понимают силу, действующую извне на единицу поверхности *S*, внешняя нормаль к которой направлена по орту *n*. Если система натяжений T_n на поверхности *S* эквивалентна электромагнитной силе, действующей на объем *V*, то эту силу можно найти путем суммирования элементарных сил натяжения $T_n dS$.

$$\overrightarrow{F_V} = \int_V \overrightarrow{f_V} dV = \oint_S \overrightarrow{T_n} dS = \overrightarrow{q_x} F_x + \overrightarrow{q_y} F_y , \qquad (9)$$

где q_x, q_y – расстояние от начала системы координат по осям *x*, *y*.

Составляющие электромагнитной силы по осям прямоугольной системы координат:

$$F_x = \oint_S T_{nx} dS , \; F_y = \oint_S T_{ny} dS , \qquad (10)$$

где T_{nx}, T_{ny} – компоненты вектора магнитного натяжения T_n по осям системы координат.

Выражение для определения силы натяжения на произвольно ориентированной в магнитном поле поверхности можно представить в виде

$$\overrightarrow{T_n} = \frac{1}{\mu}\left(\vec{B}B_n - 0{,}5B^2\vec{n}\right), \qquad (11)$$

где *B* – вектор магнитной индукции в рассматриваемой точке поверхности *S*;

B_n – нормальная составляющая магнитной индукции;

n – нормальный орт к той стороне поверхности, на которую действует натяжение T_n.

Суммируя элементарные моменты относительно начала системы координат найдем электромагнитный момент и его составляющие относительно осей *x* и *y*

$$\overrightarrow{M} = \oint_S \left[\vec{r}\overrightarrow{T_n}\right] dS = \overrightarrow{q_x} M_x + \overrightarrow{q_y} M_y , \qquad (12)$$

где *r* – радиус-вектор элемента поверхности *S*.

Электромагнитный момент погружного ПЭМП рассчитан с помощью функции *Torque*, использующей проекции тензора магнитного натяжения на оси системы координат. В специальной литературе указывается на возможность использования двух основных способов учета механической мощности в конечно-элементных моделях: с помощью моделей с неподвижной сеткой; с помощью моделей, имеющих подвижную сетку (*Moving mesh*), воспроизводящую вращение ротора. Необходимость предварительного измерения токов статора физической модели при каждом значении скольжения увеличивает трудоемкость первого способа определения механической характеристики. Постановка двухмерной электромагнитной задачи с использованием в качестве исходных данных напряжения питания устраняет эту необходимость. Таким образом, каждая точка характеристики рассчитывалась как отдельный установившийся режим. Механические характеристики погружного ПЭМП с магнитожидкостным заполнением и без заполнения (штриховая линия) представлены на рис. 8.

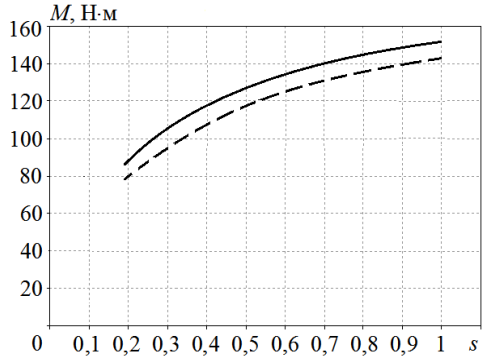


Рис. 8 – Механические характеристики погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения

Механические характеристики погружного ПЭМП с магнитожидкостным заполнением и без получены по результатам параметрических расчетов модели. Переменным параметром являлась угловая частота вращения ротора, выраженная через частоту напряжения питания. Значения электромагнитного момента для различных значений скольжения получены из решения уравнений квазистационарного электромагнитного поля. Данные расчета свидетельствуют о том, что результирующее значение момента для двух цилиндрических частей ротора погружного преобразователя в среднем возрастает на 8–10 % в сравнении с вариантом без магнитожидкостного заполнения.

Выводы. В работе методом конечных элементов проведено математическое моделирование взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических преобразователях с магнитожидкостным заполнением. Получены механические характеристики, зависимости распределения магнит-

ной индукции и плотности вихревого тока в активной части погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения. Применение магнитной жидкости в электромеханических преобразователях позволит обеспечить увеличение электромагнитного момента в среднем на 8-10 % за счет снижения магнитного сопротивления воздушного зазора, а также улучшить условия теплообмена с окружающей средой.

Список литературы

1. Макаров В. М, Калаева С. З., Шипилин А. М. Переработка железосодержащих отходов с получением наночастиц для изготовления магнитной жидкости. Нанотехника. 2004. № 12. С. 66–69.
2. Scherer C., and Figueiredo Neto A .M., Ferrofluids: Properties and Applications, Brazilian J. Phys. 2005. V. 35. pp. 718–727.
3. Пшеничников А. Ф, Лебедев А. В. Магнитная восприимчивость концентрированных ферроколлоидов. Коллоидный журнал. 2005. Т 67. № 2. С 218–230.
4. Гладких Д. В., Диканский Ю. И., Балабанов К. А., Радионов А. В. О влиянии структурной организации на релаксацию магнитного момента дисперсных частиц в магнитной жидкости. ЖТФ. 2005. № 75, вып. 10. С. 139–142.
5. Adolphi N. et al. Characterization of magnetic nanoparticle by dynamic light scattering. Phys. Med. Biol. 2010. V 55, pp. 5985–6003.
6. Yoon S., Journal of the Korean Physical Society. 2011. V 59, 3069 p.
7. Диканский Ю. И., Испирян А. Г. и др. Особенности намагничивания магнитных коллоидных наносистем на парафиновой основе. Сб. тр. 16-й Междунар. Плесской научн. Конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. 2014. С. 22–30.
8. Заблодский Н. Н., Грицюк В. Ю. Мультиградиентность полей в массиве ротора шнекового электромеханического преобразователя. Вісник Національного технічного ун-ту «ХПІ». Зб. наук. пр. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Харків. НТУ «ХПІ». 2016. № 11(1183). С. 88–92.
9. Старовойтов В. А. Магнитожидкостное охлаждение электрических машин. Вестник Кузбасского госуд. техн. ун-та. 2005. № 2(46). С. 20–22.
10. Заблодский Н. Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения. Монография. Алчевск. 2008. 340 с.
11. Васьковський Ю. М. Польовий аналіз електричних машин. НТУ *«КПІ». 2007. 191 с.*
12. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва. Энергия. 1969. 440 с.
13. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах. Энергоатомиздат. 1986. 255 с.
14. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. Москва. Высшая школа. 1989. 312 с.

References (transliterated)

1. Makarov V. M, Kalaeva S. Z., Shipilin A. M. Pererabotka zhelezosoderzhashchikh otkhodov s polucheniem nanochastits dlya izgotovleniya magnitnoy zhidkosti. [Iron-containing waste processing with nanoparticles obtaining for the magnetic fluid production] Nanotekhnika. Publ., 2004. no. 12. pp. 66–69.
2. Scherer C., Figueiredo Neto A .M. [Ferrofluids: Properties and Applications]. Brazilian J. Phys. Publ., 2005. vol. 35. pp. 718–727.
3. Pshenichnikov A. F, Lebedev A. V. Magnitnaya vospriimchivost' kontsentrirovannykh ferrokolloidov. [Concentrated ferrocolloids magnetic susceptibility]. Kolloidnyy zhurnal. Publ., 2005. vol. 67. no. 2. pp 218–230.
4. Gladkikh D. V., Dikanskiy Yu. I., Balabanov K. A., Radionov A. V. O vliyanii strukturnoy organizatsii na relaksatsiyu magnitnogo momenta dispersnykh chastits v magnitnoy zhidkosti. ZhTF. Publ., 2005. vol. 75, no. 10. pp. 139–142.
5. Adolphi N. et al. Characterization of magnetic nanoparticle by dynamic light scattering. Phys. Med. Biol. Publ., 2010. vol. 55, pp. 5985–6003.
6. Yoon S. Determination of the temperature dependence of the magnetic anisotropy constant in magnetite nanoparticles. J Korean Phys Soc. Publ., 2011. vol., 59. no. 5. pp. 3069–3073.
7. Dikanskiy Ju. I., Ispirjan A. G. i dr. Osobennosti namagnichivanija magnitnyh kolloidnyh nanosistem na parafinovoj osnove. [Features of the magnetic colloidal nanosystems magnetization on a paraffin basis]. Sb. tr. 16-j Mezhdunar. Plesskoj nauchn. Konf. po nanodispersnym magnitnym zhidkostjam. Publ., 2014. pp. 22–30.
8. Zablodskiy N. N., Gritsyuk V. Yu. Mul'tigradientnost' poley v massive rotora shnekovogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya. [Fields' multi-gradient in the rotor array of a screw electromechanical converter]. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho un-tu «KhPI». Zb. nauk. pr. Seriya: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennya enerhiyi. Kharkov. NTU «KhPI». Publ., 2016. no. 11 (1183). pp. 88–92.
9. Starovoytov V. A. Magnitozhidkostnoe okhlazhdenie elektricheskikh mashin. [Magnet-liquid cooling of electrical machines] Vestnik Kuzbasskogo gosud. tekhn. un-ta. Publ., 2005. no., 2(46). pp. 20–22.
10. Zablodskiy N. N. Polifunkcional'nye jelektromehanicheskie preobrazovateli tehnologicheskogo naznachenija. [Polyfunctional Electromechanical Converters Technological Purpose]. Monografija. Alchevsk. Publ., 2008. 340 p.
11. Vas'kovs'kiy Yu. M. Pol'ovyy analiz elektrychnykh mashyn. [Field Analysis of Electric Machines]. NTU «KPI». Publ., 2007. 191 p.
12. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha. [Heat Transfer]. Moskva. Jenergija. Publ., 1969. 440 p.
13. Filippov I. F. Teploobmen v jelektricheskih mashinah. Jenergoatomizdat. [Heat transfer in electrical machines]. Publ., 1986. 255 p.
14. Ivanov-Smolenskiy A. V. Jelektromagnitnye sily i preobrazovanie jenergii v jelektricheskih mashinah. [Electromagnetic forces and energy conversion in electrical machines]. Moskva. Vysshaja shkola. Publ., 1989. 312 p.

Поступила (received) 02.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Применение магнитной жидкости с фазовым переходом в погружных электромеханических преобразователях / Н. Н. Заблодский, В. Ю. Грицюк, П. Б. Клендий, Д. С. Сорокин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 67–74. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2409-9295.

Применение магнитной жидкости с фазовым переходом в погружных электромеханических преобразователях / Н. Н. Заблодский, В. Ю. Грицюк, П. Б. Клендий, Д. С. Сорокин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 67–74. – Библиогр.: 14 назв. – ISSN 2409-9295.

A magnetic fluid application with a phase transition in a submersible electromechanical converters / N. N. Zablodskiy, V. YU. Gritsyuk, P. B. Klendiy, D. S. Sorokin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 67–74. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Заблодський Микола Миколайович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, професор кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання; (050) 686-99-56; e-mail: zablodskiynn@gmail.com.

Заблодский Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, профессор кафедры электрических машин и эксплуатации электрооборудования; (050) 686-99-56; e-mail: zablodskiynn@gmail.com.

Zablodskiy Nikolay Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Professor of the Department of Electrical machines and maintenance of Electric equipment; tel. +38 (050) 686-99-56; e-mail: zablodskiynn@gmail.com.

Грицюк Володимир Юрійович, кандидат технічних наук, Донбаський державний технічний університет, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем та електропривода; (099) 948-54-33; e-mail: gritsyukvy@gmail.com.

Грицюк Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, Донбасский государственный технический университет, доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем и электропривода; (099) 948-54-33; e-mail: gritsyukvy@gmail.com.

Gritsyuk Vladimir Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Donbas State Technical University, Associate Professor at the Department of Automated electromechanical systems and Electric drive; tel. +38 (099) 948-54-33; e-mail: gritsyukvy@gmail.com.

Клендій Петро Богданович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, доцент кафедри енергетики і автоматики; (096) 604-52-19; e-mail: pklen_@i.ua.

Клендий Петр Богданович, кандидат технических наук, доцент, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, доцент кафедры энергетики и автоматики; (096) 604-52-19; e-mail: pklen_@i.ua.

Klendiy Petro Bogdanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Associate Professor of the Department of Power Engineering and Automation; tel. +38 (096) 604-52-19; e-mail: pklen_@i.ua.

Сорокін Дмитро Сергійович, кандидат технічних наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України, старший викладач кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання; (063) 073-41-59; e-mail: sdima.asp@gmail.com.

Сорокин Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, старший преподаватель кафедры электрических машин и эксплуатации электрооборудования; (063) 073-41-59; e-mail: sdima.asp@gmail.com.

Sorokin Dmitro Sergiyovich, Candidate of Technical Sciences, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Senior Lecturer of the Department of Electrical machines and maintenance of Electric equipment; tel. +38 (063) 073-41-59; e-mail: sdima.asp@gmail.com.

УДК 621.313.2

М. В. БУРШТИНСЬКИЙ, М. В. ХАЙ, Б. М. ХАРЧИШИН

НЕПРЯМЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ ДОСЛІДЖУВАНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Розглядається спосіб визначення обертального моменту електродвигуна за допомогою некаліброваного навантажувального генератора постійного струму без стабілізації магнітного потоку. Обгрунтовується спосіб непрямого визначення електрорушійної сили для визначення обертального моменту. Пропонується методика розрахунку потужності на валу досліджуваного двигуна. Підвищена точність вимірювання обертального моменту на валу.

Ключові слова: обертальний момент, навантажувальний генератор, стабілізація магнітного потоку, електрорушійна сила, потужність на валу.

Рассматривается способ определения вращающего момента электродвигателя с помощью некалиброванного нагрузочного генератора постоянного тока без стабилизации магнитного потока. Обосновывается способ косвенного определения электродвижущей силы для определения вращающего момента. Предлагается методика расчета мощности на валу исследуемого двигателя. Повышена точность измерения вращающего момента.

Ключевые слова: вращающий момент, нагрузочный генератор, стабилизация магнитного потока, электродвижущая сила, мощность на валу.

Formulation of the problem. The absence of method in determining the torque using a load generator, while magnitude of the magnetic flux of the latter is neither defined nor crucial in terms of stability. **The aim.** The development of a relatively inexpensive method for determining the torque on a shaft that will allow to increase the accuracy of measurements. **Practical value.** Increases accuracy of determining the torque value of the researched electric motor using a load generator without stabilization of the magnetic flux. **Originality.** Implementing an indirect determination of the electromotive force by the voltage drop across the load and in the circle of an anchor in the constant current generator.

Keywords: torque, load generator, stabilization of magnetic flux, electromotive force, shaft power.

Вступ. Відомі різні за точністю та вартістю методи вимірювання обертального моменту досліджуваного двигуна. Хороші та точністю але дорогими є прямі методи вимірювання моменту, до яких відносять вимірювання за допомогою торсіонних моментомірів, побудованих переважно на тензометричних елементах [1] у вигляді спеціальних муфт, та за допомогою динамометра, прикладеного до статора навантажувального генератора, що закріплений на стоякових підшипниках – так званої балансувальної машини [2, 3]. Однак такі вимірювання є невиправдано дорогими, коли йдеться про одиничні випробування.

Існують також непрямі методи вимірювання моменту, які розділяють на динамічні [4] та статичні. Для електродвигунів малої та середньої потужності доцільно застосовувати саме статичні методи (у деякій літературі – квазістатичні) з безпосереднім навантаженням без повернення енергії в мережу [2, 5]. Це пояснюється малими значеннями моментів інерції махових мас і значним впливом перехідних процесів на швидкість обертання. Особливо це стосується випробування асинхронних двигунів. Повернення енергії в мережу, пов'язане з необхідністю збільшення потужності навантажувального генератора, є економічно недоцільним.

У будь-якому випадку випробування передбачає створення стенда для визначення параметрів електродвигунів під навантаженням, де гальмівне навантаження створює найчастіше генератор постійного струму з незалежним збудженням, що працює на електричну навантагу [6].

Доволі точним методом є застосування як навантажувального генератора тарованої машини постійного струму, в якої наперед відомі всі види втрат за будь-яких режимів роботи (напругах, швидкостях, навантаженнях). Однак процедура тарування машини постійного струму є доволі складною і дорогою.

Значно дешевшим є розрахунковий метод визначення обертального моменту шляхом гальмування звичайним генератором постійного струму з незалежним збудженням з компенсаційною обмоткою [7, 8].

Вважається, що гальмівний момент $M_г$, що розвивається таким генератором, пропорційний добутку струму в якорі I на потік Ф. Потік Ф у першому наближенні вважається залежним тільки від струму збудження. При роботі з незалежним збудженням на незмінний навантажувальний опір струм I пропорційний електрорушійній силі в якорі. Оскільки вона пропорційна потоку Ф та частоті обертання n , то

$$M_{\text{г}} = kn\Phi^2, \qquad (1)$$

де k – конструктивний коефіцієнт.

Таким чином, $M_{\text{Г}} = f(n)$ для кожного значення потоку виражається прямою лінією, що проходить через початок координат. Крива обертального моменту досліджуваного двигуна перетинається у точках, що характеризують рівність обертального моменту двигуна та гальмівного моменту генератора [8].

При застосуванні цього методу слід мати на увазі умови стійкої роботи пари двигун – навантажувальний генератор. Умовою стійкості роботи системи є виконання нерівності

$$\frac{dM_{\text{г}}}{dt} > \frac{dM_{\text{д}}}{dt},$$

де $M_{\text{д}}$ – момент випробовуваного двигуна.

© М.В. Бурштинський, М.В. Хай, Б.М. Харчишин, 2018

Зона нестійкої роботи може проявитися при дослідженні асинхронних двигунів, зокрема при знятті механічних характеристик двигунів великої потужності.

Однак сучасні асинхронні двигуни малої та середньої потужності мають високі значення кратностей пускового, мінімального та максимального моментів [9], тому умова стійкості роботи при випробуванні виконується.

Цей метод передбачає стабільність магнітного потоку, який через реакцію якоря навіть у скомпенсованій машині є далеко не сталим. Зважаючи на те, що гальмівний момент $M_г$ генератора залежить від магнітного потоку у квадраті, то навіть при незначній нестабільності магнітного потоку похибка зростає у квадрат разів. Відомо, що розмагнічувальна дія реакції якоря у добре спроектованій машині постійного струму є ідеально скомпенсованою тільки при номінальній навантазі, тому цей спосіб є недостатньо точним для інженерної практики і може використовуватись тільки з навчальною метою.

Постановка задачі. Під час досліджень асинхронних двигунів на відповідність заводським показникам перед дослідниками постало завдання розроблення чи удосконалення існуючого методу визначення обертального моменту, для якого величина магнітного потоку не визначається і не є критичною з точки зору її стабільності.

Об'єктом дослідження є метод визначення обертального моменту за допомогою навантажувального генератора постійного струму.

Мета дослідження: розробити відносно недорогий метод визначення обертального моменту на валу, що дозволить підвищити точність вимірювань.

Виклад основного матеріалу. Обертальний момент на валу двигуна дорівнює вхідному моменту генератора постійного струму $M_г$, що складається з моменту втрат M_0 та електромагнітного моменту $M_{ем}$:

$$M_г = M_0 + M_{ем} = \frac{P_0}{\omega} + \frac{P_{ем}}{\omega}, \qquad (2)$$

де P_0 та $P_{ем}$ –втрати потужності та електромагнітна потужність відповідно;

ω – кутова частота обертання.

Рівняння напруг генератора має вигляд:

$$E = U_н + \Delta U_a, \qquad (3)$$

де E – електрорушійна сила генератора;

$U_н$ – спад напруги на опорі навантаження;

$\Delta U_a = I_a R_a$ – внутрішній спад напруги на всіх опорах якірного кола R_a (обмотки якоря, додаткових полюсів, щіток, перехідних контактів тощо);

I_a – струм якоря, що дорівнює струму навантаження.

Залежність $\Delta U_a = f(I_a)$ не є ідеально лінійною через вплив нестабільного опору щітково-колекторного вузла.

Потужність на валу досліджуваного двигуна P_2 визначається непрямим способом через електричну потужність, яка виділяється у зовнішньому та внутрішньому колі якоря генератора, через магнітні втрати в активному залізі ротора та механічні (в тому числі аеродинамічні) втрати.

Електрична потужність, яку розвиває генератор $P_{ел}$, дорівнює електромагнітній і визначається як

$$P_{ел} = E \cdot I_a = (U_н + \Delta U_a(I_a)) \cdot I_a. \qquad (4)$$

Величини $U_н$ та I_a визначаються безпосереднім вимірюванням, а для визначення $\Delta U_a = f(I_a)$ належить здійснити окреме визначення спаду напруги у внутрішньому електричному колі при вимкненому струмові збудження за нерухомого ротора генератора. Особливість такого підходу полягає в тому, що електрорушійна сила E, яка утворюється в генераторі, залежить лише від потоку збудження Ф та частоти обертання ротора n

$$E = c_e \cdot \Phi \cdot n. \qquad (5)$$

Такий підхід усуває проблему зменшення потоку Ф внаслідок впливу реакції якоря при сталому струмові збудження $i_{зб}$ = const.

Перед експериментальним визначенням залежності $\Delta U_a = f(I_a)$ належить нагріти внутрішнє коло двигуна номінальним струмом до усталеної температури.

Для визначення механічних та магнітних втрат потужності в навантажувальному генераторі перед його з'єднанням з досліджуваним двигуном проводять дослід його неробочого ходу. Сутність такого визначення механічних та магнітних втрат полягає в наступному. Оскільки прикладена до двигуна напруга

$$U = E + \Delta U_a,$$

то споживана при цьому потужність визначається за формулою:

$$U \cdot I_0 = E \cdot I_0 + \Delta U_a \cdot I_0. \qquad (6)$$

Ця потужність є не що інше як втрати електричні ($\Delta U_a \cdot I_0$) та механічні плюс магнітні ($E \cdot I_0$). Отож для визначення останніх необхідно знати ЕРС E та струм неробочого ходу I_0 для різних частот обертання ротора. Досягається це зміною напруги живлення U за сталого струму збудження $i_{зб}$ = const, який підтримуватиметься таким, яким він буде в режимі навантаження генератора, що працює у парі з досліджуваним двигуном. Дослід належить провести зразу за визначенням $\Delta U_a = f(I_a)$, не очікуючи охолодження генератора.

Вираз для визначення електричної, механічної та магнітної потужностей буде наступним:

$$\begin{aligned} P_{ел} &= E \cdot I_a + E \cdot I_0(n) = E \cdot (I_a + I_0(n)) = \\ &= (U_н + \Delta U_a(I_a)) \cdot (I_a + I_0(n)). \end{aligned} \qquad (7)$$

Кінцевий вираз для обчислення потужності на валу досліджуваного двигуна P_2 отримаємо, враховуючи додаткові втрати в навантажувальному генераторі без стабілізації магнітного потоку $\Delta P_{дод}$, а саме:

$$\Delta P_{\text{дод}} = 0{,}01P_{\text{н}}\left(\frac{I_a}{I_{\text{н}}}\right)^2, \quad (8)$$

де $P_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ – номінальні потужність та струм генератора.

Остаточний вираз для обчислення потужності на валу досліджуваного двигуна

$$P_2 = (U_{\text{н}} + \Delta U_a(I_a)) \cdot (I_a + I_0(n)) + 0{,}01P_{\text{н}}\left(\frac{I_a}{I_{\text{н}}}\right)^2. \quad (9)$$

Для випадку дослідження асинхронного двигуна потужність P_2 на валу згідно зі стандартом є аргументом робочих характеристик за поданої напруги живлення, схеми з'єднань обмотки статора Δ/Y та кількості пар полюсів p

$$P_1, I, \eta, \cos\varphi, n = f(P_2),$$

де P_1 – активна споживана потужність;

I – споживаний струм;

$\eta = \frac{P_2}{P_1}$ – коефіцієнт корисної дії;

$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}$ – коефіцієнт потужності;

n – частота обертання.

Потужність P_1 та струм I вимірюються безпосередньо вимірювальними приладами, а частота обертання безпосередньо або з використанням тахогенератора.

Зібрана установка у складі асинхронного двигуна, генератора постійного струму і тахогенератора дає змогу зняти механічну характеристику двигуна шляхом його навантаження і подальшим обчисленням обертального моменту за виразом

$$M_{\text{д}} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P_2}{n}.$$

Висновки. Запропонований метод дозволяє визначити потужність на валу двигуна, а, відтак і обертальний момент за допомогою некаліброваного навантажувального генератора постійного струму без стабілізації магнітного потоку. Він ґрунтується на непрямому визначенні електрорушійної сили, що пропорційна магнітному потоку, завдяки чому відпадає необхідність його стабілізації, що здешевлює та підвищує точність випробування. Цим методом перевірено чотири асинхронних двигуни, що дозволило підтвердити їх відповідність заявленим виробником характеристикам.

Список літератури

1. Гуринов А.С. Измерение крутящего момента на вращающихся валах / А. С. Гуринов, В. В. Дудник, В. Л. Гапонов, В. В. Калашников – Режим доступу: http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/798. Дата звертання 21 лютого 2018 р.
2. Коварский Е.М. Испытание электрических машин / Е. М. Коварский, Ю. И. Янко – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
3. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин. Учеб. для вузов по спец. "Электромеханика" / О. Д. Гольдберг. – М.: Высш. шк., 1990. – 255 с.
4. Бурштинський М. В. Елементна база систем електропостачання та електроприводу: Навчальний посібник. – 2-ге вид. випр. і доповн. / М. В. Бурштинський, М. В. Хай, Б. М. Харчишин – Львів, 2010. –240 с.
5. Котеленец Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. пособие для вузов по спец. "Электромеханика" / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
6. Третьяков М. Н. Испытание электродвигателей малой мощности / М. Н. Третьяков – М.–Л.: Гос.энергетич.изд-во, 1960. – 174 с.
7. Николаев С. А. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам. Изд. 2-е, переработ. и доп. Учебное пособие для техникумов / Николаев С. А. – М.: Энергия, 1969. –208 с.
8. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – 4-е изд., сокр. и перераб. / Г. К. Жерве – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 408 с.
9. http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp. Дата звертання 21 лютого 2018 р.

References (transliterated)

1. Gurinov A. S. Izmerenie krutjashhego momenta na vrashhajushhihsja valah [Measuring of twisting moment on the revolved billows] / A. S. Gurinov, V. V. Dudnik, V. L. Gaponov, V. V. Kalashnikov – Rezhim dostupa: http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/798. Data zvertannya 21 lyutoho 2018 r.
2. Kovarskij E. M. Ispytanie jelektricheskih mashin [Tests of electric machines] / E. M. Kovarskij, Ju. I. Janko – M.: Jenergoatomizdat, 1990. – 320 s.
3. Gol'dberg O. D. Ispytanija jelektricheskih mashin. Ucheb. dlja vuzov po spec. "Jelektromehanika" [Tests of electric machines] / O. D. Gol'dberg. – M.: Vyssh. shk., 1990. – 255 s.
4. Burshtyns'kyy M. V. Elementna baza system elektropostachannya ta elektropryvodu: Navchal'nyy posibnyk [Element base of the systems of power supply and electromechanic : the Train aid.] – 2-he vyd. vypr. i dopovn. / M. V. Burshtyns'kyy, M. V. Khay, B. M. Kharchyshyn – L'viv, 2010. – 240 s.
5. Kotelenec N. F. Ispytanija i nadezhnost' jelektricheskih mashin: Ucheb. posobie dlja vuzov po spec. "Jelektromehanika" [Tests and reliability of electric machines : Studies. manual for the institutes of higher on special. "Electromechanics"] / N. F. Kotelenec, N. L. Kuznecov – M.: Vyssh. shk., 1988. – 232 s.
6. Tret'jakov M. N. Ispytanie jelektrodvigatelej maloj moshhnosti [Test of electric motors of small-yield] / M. N. Tret'jakov – M.–L.: Gos.jenergetich.izd-vo, 1960. – 174 s.
7. Nikolaev S. A. Rukovodstvo k laboratornym rabotam po jelektricheskim mashinam. Izd. 2-e, pererabot. i dop. Uchebnoe posobie dlja tehnikumov [Guidance to laboratory works on electric machines] / Nikolaev S. A. – M.: Jenergija, 1969. –208 s.
8. Zherve G. K. Promyshlennye ispytanija jelektricheskih mashin. – 4-e izd., sokr. i pererab [Industrial tests of electric machines] / G. K. Zherve – L.: Jenergoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1984. – 408 s.
9. http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp. Data zvertannya 21 lyutoho 2018 r.

Надійшла (received) 04.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Непряме визначення обертального моменту досліджуваного електродвигуна / М. В. Бурштинський, М. В. Хай, Б. М. Харчишин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні ма-

шини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 75-78. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Косвенное определение вращающего момента испытуемого электродвигателя / М. В. Бурштынский, М. В. Хай, Б. М. Харчишин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 75-78. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

An indirect determination of the torque of the researched electric motor / M. V. Burshtynskyi, M. V. Khai, B. M. Kharchyshyn // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 75-78. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бурштинський Мирон Васильович, Національний університет «Львівська політехніка», інженер кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, тел. (093)690-32-93; e-mail: bursht@polynet.lviv.ua.

Бурштынский Мирон Васильевич, Национальный университет «Львивська политэхника», инженер кафедры электромехатроники и компьютеризированных электромеханических систем, тел. (093)690-32-93; e-mail: bursht@polynet.lviv.ua.

Burshtynskyi Myron Vasylovych, National University «Lvivska Polytechnica», engineer at the Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems, tel. (093)690-32-93; e-mail: bursht@polynet.lviv.ua.

Хай Михайло Васильович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, тел. (093)346-00-32; e-mail: mxaishk@gmail.com.

Хай Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент, Национальный университет «Львивська политэхника», доцент кафедры электромехатроники и компьютеризированных электромеханических систем, тел. (093)346-00-32; e-mail: mxaishk@gmail.com.

Khai Mykhailo Vasylovych, Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), Associate Professor, National University «Lvivska Polytechnica», Associate Professor at the Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems, tel. (093)346-00-32; e-mail: mxaishk@gmail.com.

Харчишин Богдан Михайлович, кандидат технічних наук, с.н.с., Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, тел. (095)105-14-71; e-mail: xbohdan@gmail.com.

Харчишин Богдан Михайлович, кандидат технических наук, с.н.с., Национальный университет «Львивська политэхника», доцент кафедры электромехатроники и компьютеризированных электромеханических систем, тел. (095)105-14-71; e-mail: xbohdan@gmail.com.

Kharchyshyn Bohdan Mykhailovych, Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), Senior Research Fellow, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems, tel. (095)105-14-71; e-mail: xbohdan@gmail.com.

УДК 621.313

О. М. ПОПОВИЧ, О. В. БІБІК

ПОШУК І ОЦІНКА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МОНОБЛОЧНОГО НАСОСУ ЗА ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Для цілей комплексного проектування асинхронних двофазних двигунів обгрунтовано застосування структурної математичної моделі двигуна із інтеграцією її до імітаційної моделі електромеханічної системи, яка враховує при розрахунках квазістатичних режимів роботи нелінійні залежності параметрів заступної схеми, спектр просторових гармонік магнітного поля, складну структуру обмотки статора. Із використанням у якості критерію ефективності виразу для визначення ККД у квазісталому режимі при еліптичності поля досліджено можливості підвищення енергоефективності при варіюванні кількістю витків фаз серійної і синусної обмотки статора.

Ключові слова: двофазний асинхронний двигун, комплексне проектування, математична модель, квазістатичний режим, просторова несинусоїдність.

Для задач комплексного проектирования асинхронных двухфазных двигателей обосновано применение структурной математической модели двигателя, интегрированной в имитационную модель электромеханической системы, которая учитывает при расчетах квазистатических режимов работы нелинейные зависимости параметров схемы замещения, спектр пространственных гармоник магнитного поля, сложную структуру обмотки статора. При использовании в качестве критерия эффективности выражения для определения КПД в квазистатическом режиме при эллиптичности поля, исследованы возможности повышения энергоэффективности при варьировании количеством витков фаз серийной и синусной обмотки статора.

Ключевые слова: двухфазный асинхронный двигатель, комплексное проектирование, математическая модель, квазистатический режим, пространственная несинусоидальность.

Purpose. The study of the possibility of applying energy efficiency measures to a two-phase asynchronous pump engine, provided that the efficiency criteria of the complex energy coefficients are used as criteria of efficiency. **Methodology.** Application of the structural mathematical model of the engine integrated into the simulation model of the electromechanical system that takes into account the nonlinear dependencies of the parameters of the replacement circuit, the spectrum of the spatial harmonics of the magnetic field, and the complex structure of the stator winding in calculating quasistatic operating modes **Results. Originality.** Use as an efficiency criterion of an expression for determining the efficiency in a quasistatic regime with ellipticity of the field. **Practical value.** The possibilities of increasing the energy efficiency are investigated with varying the number of turns of the phases of the serial and sine winding of the stator.

Keywords: two-phase asynchronous motor, complex design, mathematical model, quasi-static mode, spatial non-sinusoidal.

Вступ. Моноблочний насос БЦ1,1-20-У1 оснащено двофазним двополюсним конденсаторним асинхронним двигуном (АД) із потужністю 550 Вт на валу якого розміщено робоче колесо відцентрового насосу. Насос призначено для роботи в умовах невеликих статичних напорів. Особливості робочих режимів АД насосу пов'язані: із зміною ступеня еліптичності поля статора із зміною ковзання; із участю у процесі електромеханічного перетворення енергії третьої просторової гармоніки статора; із підвищеним опором обмотки ротора для забезпечення потрібних пускових властивостей АД.

Пошук співвідношення величин конструктивних параметрів АД для забезпечення максимальної енергоефективності здійснюють у процесі чисельного дослідження параметрів робочих режимів. Найбільш проста технічна реалізація зміни величини конструктивних параметрів має місце при варіюванні кількістю витків фаз і ємністю конденсатора.

До трьох параметрів, які варіюються (виткі та ємність) при формуванні енергоефективних режимів АД додається ще величина ковзання. Цього нема при проектування АД у складі електромеханічної системи (ЕМС), яке має певні переваги:

1. Використання у якості критерію ефективності комплексних енергетичних показників системи сприяє створенню умов для забезпечення максимальної ефективності за кінцевим результатом. При цьому враховується взаємний вплив складових системи.

2. Проектування АД за моделлю ЕМС з урахуванням наявного квазісталого режиму, який має місце внаслідок еліптичності поля статора, забезпечує аналіз при урахуванні коливань швидкості ротора.

3. При проектуванні АД у складі ЕМС із заданням на його валу величини моменту опору спрощуються алгоритми пошуку оптимуму завдяки вилучення ковзання із параметрів, що варіюються.

4. Використання математичної моделі динамічних режимів ЕМС з АД забезпечує ефективний проектний синтез із урахуванням нелінійності електромагнітних параметрів завдяки відсутності проблем збіжності ітераційних циклів, що має місце під час розрахунку статичних режимів. Адекватність динамічної моделі із нелінійними параметрами забезпечується урахуванням диференційних параметрів.

Постановка задачі. Метою даної роботи є дослідження можливості застосування заходів підвищення енергоефективності ЕМС насосу БЦ1,1-20-У1 за умови використання у якості критеріїв ефективності комплексних енергетичних коефіцієнтів.

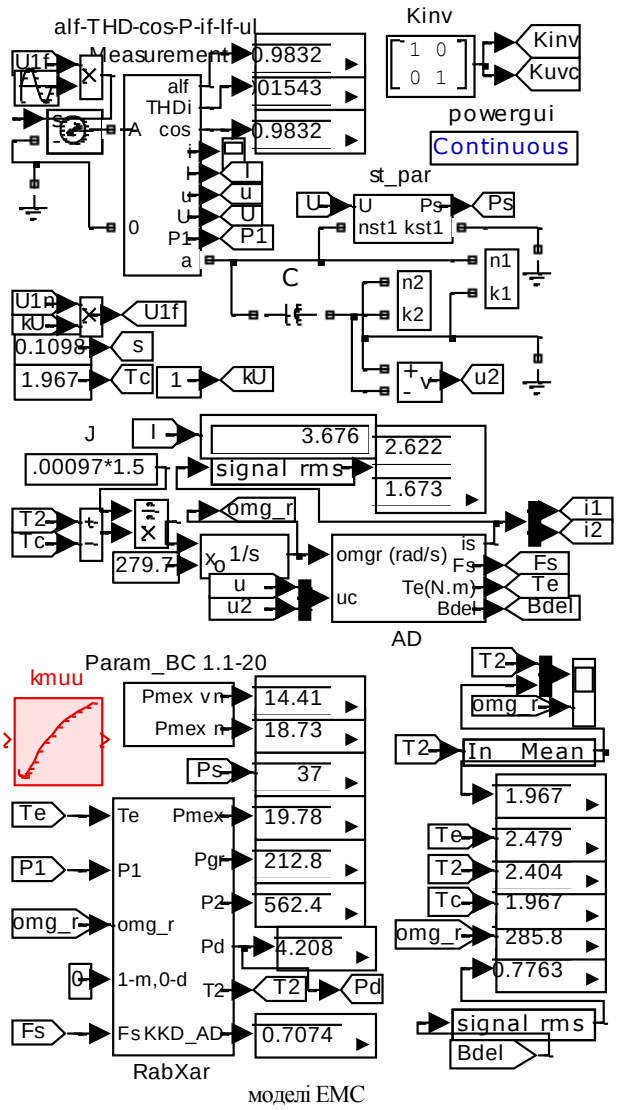
Математична модель ЕМС. Імітаційну модель ЕМС насоса [2, 4] наведено на рис. 1. Модель складається з блоків системи живлення та вимірювача її параметрів, імітаційних блоків вивідних кінців фаз АД (n1-k1, n2-k2) та підключеного паралельно до його входу блоку урахування втрат потужності у сталі та додаткових (st_par), а також конденсаторів. Для розрахунку величин електромагнітних параметрів, струмів та моментів двигуна, його робочих характеристик використовуються блоки структурного моделювання, відповідно: Param, AD, RabXar.

На дисплеях рис. 1 наведено деякі результати розрахунку. У нижній частині рисунку, лівий стовпчик,

© О.М. Попович, О.В.Бібік, 2018

відповідно: вентиляційні і повні механічні втрати [6], втрати у сталі, механічні втрати [2], гріючи втрати, корисна потужність, додаткові втрати, ККД АД.

Рис. 1 – Імітаційна та структурна математичні



Правий стовпчик, відповідно: середнє значення корисного моменту АД, електромагнітний момент, корисний момент, момент опору на валу, миттєве значення частоти обертання ротора, середньоквадратичне значення індукції у повітряному проміжку. У верхній частині рисунку: коефіцієнт потужності, THD_i , косинус за першою гармонікою. Результат розрахунку статичної механічної характеристики наведено на рис. 2.

Математична модель АД за величинами напруги і частоти джерела живлення, а також частоти обертання дозволяє визначити величини електромагнітного моменту, корисної потужності і втрат АД. В залежності від співвідношення електромагнітного моменту АД і моментів опору на валу і механічних втрат у АД, розраховується залежність зміни швидкості, яка впливає на характеристики двигуна. Перехідний процес закінчується із визначенням усталеного режиму, коли моменти рухомий та опору на валу стають рівними. У процесі розрахунку за величинами моментів (електромагнітного та власного опору АД) коригуються корисна потужність АД і втрати у його підшипниках. За результатами розрахунку режиму роботи визначається величина індукції у повітряному проміжку АД, яка є вхідною величиною для визначення втрат у сталі. Також, визначається величина сумарної МРС машини для визначення коефіцієнта насичення магнітного кола за основним полем (за заздалегідь розрахованими залежностями), що дозволяє розрахувати величину відповідних індуктивних параметрів.

Математична модель асинхронного двигуна.

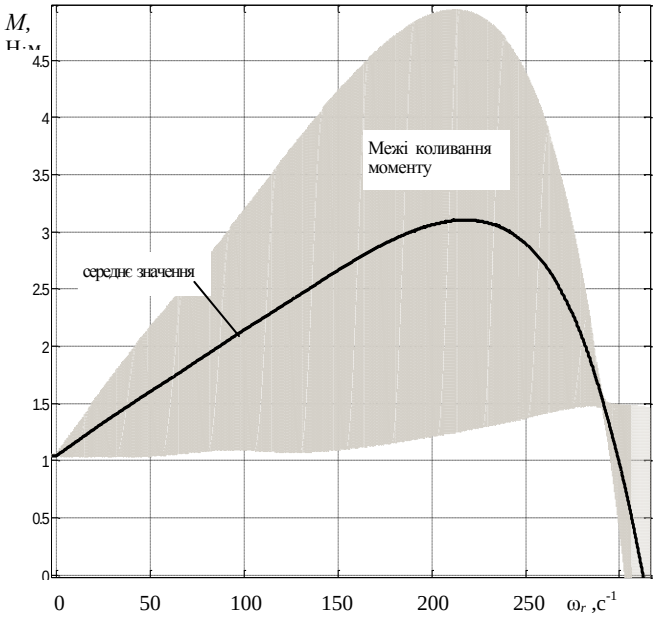


Рис. 2 – Розрахункова механічна характеристика двигуна насосу

Режими дослідження ЕМС обумовлюють вимоги до математичної моделі АД: щодо її інтеграції до моделі ЕМС, врахування зміни втрат і електромагнітних параметрів АД. Цим вимогам задовольняє математична модель асинхронного двигуна електромеханотронної системи при імітаційному та структурному моделюванні [3–5], яку застосовано у роботі.

Для врахування втрат у сталі при моделюванні режиму роботи паралельно АД до його вхідних клем приєднана система опорів, втрати у якій імітують величину втрат у сталі, що визначається за масою магнітопроводу і величиною питомих втрат у ньому відповідно до відомого виразу: $p_{cm} = p_{1,50}(f/50)^{\alpha} B_m^2$, де $p_{1,50}$ – питомі втрати у сталі шихтованого магнітопроводу із стандартною товщиною листів при індукції 1 Тл і частоті 50 Гц; f – частота живлення; α – коефіцієнт, що залежить від марки сталі, величина якого обумовлена співвідношенням втрат на гістерезис і вихрові струми; B_m – амплітуда магнітної індукції в магнітопроводі, яка визначається при розрахунку магнітного кола за величиною сумарної МРС машини у даному режимі. Розрахунок виконано при $p_{1.5,50}$ = 5,0 Вт/кг; α = 1,3; коефіцієнті збільшення втрат у сталі 2,0. Разом з втратами у сталі враховано додаткові втрати у АД, які прийнято як 0,5 % від

номінальної спожитої потужності із коригуванням пропорційно співвідношенню квадратів модуля МРС статора досліджуваного режиму і номінального. Урахування співвідношення МРС замість струмів забезпечує дослідження із зміною схем обмотки статора.

Механічні втрати визначено з урахуванням впливу зміни частоти обертання ротора і моменту навантаження за трьома складовими: тертям у підшипниках, втратами у вентиляційному вузлі зовнішнього обдування та аеродинамічними втратами всередині машини. У формулах визначення втрат на вентиляцію використана функціональна залежність від розмірів вентилятора та частоти обертання у третьому ступені [1, 2]. Втрати у підшипниках визначено в залежності від ваги ротора.

Чисельний експеримент. Розрахунок здійснювався у двох варіантах: урахування тільки основної гармоніки МРС; урахування гармонік з номерами 1, 3, 5, 7. Величину моменту опору задано 1,967 Н·м, ємність конденсатора: С = 16 мкФ. Параметри заступної схеми визначено у відповідності з [6] для номінального режиму роботи. Враховано взаємну індуктивність фаз за шляхами потоку пазового і лобового розсіювання. Для врахування нелінійності параметрів за основним полем враховано залежності зміни коефіцієнтів насичення у функції МРС, які розраховано відповідно до [6].

Результати розрахунків зведено до табл. 1, де наведено значення: корисної потужності, частоти обертання ротора, ККД, коефіцієнту потужності, середньоквадратичної індукції у повітряному проміжку, нагрівальних втрат, струмів фаз та мережі (номінальний та пусковий), пускового моменту АД.

Конструктивні параметри схем обмотки для трьох варіантів аналізу також зведено до табл., де вказано на номери за пазами перших n_1 та других n_2 сторін секцій обмотки, з яких складаються фази статора (знак вказує на напрямок обходу секції,), на кількість витків секції W і діаметр її проводу без ізоляції d_c. Першій стовпчик таблиці відповідає базовому варіанту, другий і третій – показують можливості вдосконалення при варіюванні кількістю витків для базової і синусної обмоток відповідно.

Значення циклового ККД, яке наведено у таблиці, є екстремальною величиною при варіюванні кількості витків. Вираз для визначення ККД у квазісталому режимі при еліптичності поля є:

$$\eta = \frac{\int_0^T \omega_r \left(M_{em} - M_{ad} - 3{,}75\cdot 10^{-4} G_r - \frac{P_{vennom}}{\omega_{rnom}} \left(\frac{\omega_r}{\omega_{rnom}} \right)^2 \right) dt}{\int_0^T u i_l dt},$$

де ω_r – частота обертання ротора, с$^{-1}$; G_r – вага ротора, Н; u, i_l – величини напруги і струму мережі; M_{em} – електромагнітний момент двигуна; M_{ad} – додаткові моменти, які пов'язані із величиною додаткових втрат і коефіцієнтом перетворення їх у механічну потужність, який прийнято рівним 0,5, Н·м; $P_{vennom} = P_{mecnom} - P_{beanom}$ – номінальні вентиляційні втрати; $P_{mecnom}, P_{beanom}, \omega_{rnom}$ – номінальні значення механічних втрат [6], втрат у підшипниках [2], частоти обертання.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

конструкт. параметр схеми		Варіант обмотки					
		W = 51; 105		W = 50; 94		синус. обмотка	
фаза А	n_1	5,6,7,8,-17,-18,-19,-20		5,6,7,8,-17,-18,-19,-20		4,3,2,1,-16,-15,-14,-13	
	n_2	-16,-15,-14,-13,4,3,2,1		-16,-15,-14,-13,4,3,2,1		-9,-10,-11,-12,21,22,23,24	
	W	51,51,51,51,51,51,51,51		50,50,50,50,50,50,50,50		41,43,50,52,41,43,50,52	
	d_c, мм	0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71		0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71		0.56,0.56,0.71,0.71,0.56,0.56,0.71,0.71	
фаза В	n_1	12,11,-23,-24		12,11,-23,-24		10,9,8,7,-22,-21,-20,-19	
	n_2	-21,-22,10,9		-21,-22,10,9		-15,-16,-17,-18,3,4,5,6	
	W	105,105,105,105		94,94,94,94		56,59,68,73,56,59,68,73	
	d_c, мм	0.5,0.5,0.5,0.5		0.53,0.53,0.53,0.53		0.45,0.45,0.6,0.6,0.45,0.45,0.6,0.6	
параметр робочого режиму		просторові гармоніки					
		1	1,3,5,7	1	1,3,5,7	1	1,3,5,7
P_{out}, Вт		556.7	554.5	556.6	554.9	564.2	564.3
ω_r,с$^{-1}$		283.3	281.9	282.5	281.4	287	286.3
η		**0.7235**	**0.705**	**0.7235**	**0.7082**	**0.713**	**0.711**
cosφ АД		0.996	0.997	0.987	0.988	0.979	0.979
$B_{\delta 1}$,Тл		0.737	0.735	0.738	0.735	0.787	0.786
$P_{нгр}$,Вт		193.5	215.2	193.4	209.5	206.8	208.8
I_{s1}, А		2.40	2.45	2.72	2.75	2.66	2.66
I_{s2}, А		1.65	1.66	1.56	1.57	1.7	1.69
I_l, А		3.51	3.59	3.54	3.60	3.67	3.68
I_1, А		9.91	9.81	10.3	10.2	10.65	10.55
M_1, Н·м		1.06	1.04	0.942	0.924	1.06	1.06

Висновки. Дослідження АД у складі ЕМС забезпечує застосування комплексних критеріїв ефективності і визначення, відповідно до них, оптимального співвідношення конструктивних параметрів.

1. Застосування комплексних математичних моделей ЕМС з АД підвищує ефективність процесу пошуку оптимального варіанту завдяки вилученню ковзання з числа варійованих параметрів.
2. Комплексний чисельний експеримент при варіюванні кількістю витків базового варіанту обмотки статора АД насосу БЦ1,1-20-У1 показав можливість збільшення ККД на третину відсотка.
3. При виконанні обмотки чотирма діаметрами проводу із наближенням розподілу МРС до синусного, ККД АД можна збільшити на 1 відсоток, порівняно із базовим варіантом, без погіршення пускових властивостей.

Список літератури

1. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: Учеб.пособие для студентов вузов / Балагуров В.А. – М.: Высш.школа, 1982. – 272 с.

2. Бібік О.В. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку / О.В. Бібік, О.М. Попович, С.П. Шевчук // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 38-45.
3. Попович О.М. Математична модель для дослідження режимів асинхронних машин електромеханотронних систем// Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – 2010. – Вип.25. – С. 89 – 97.
4. Попович О.М. Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання// Техн. електродинаміка. – 2010. – № 4. – С. 25 – 32.
5. Попович О.М. Уточнення аналізу режимів роботи асинхронних двигунів у складі електромеханотронних систем еквівалентуванням їх польових моделей коловими / О.М. Попович, І.В. Головань // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 113-115.
6. Радин В.И.Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / В.И. Радин, Й. Лондин, В.Д. Розенкноп и др.; под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

References (transliterated)

1. Balagurov V.A. Proyektirovaniye spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka: Ucheb.posobiye dlya studentov vuzov [Design of special electrical machines of alternating current: Ucheb.Posobiye for students of higher education institutions] Moscow: High school, 1982, 272 p.
2. Bibik O.V., Popovych O.M., Shevchuk S.P. Yenergoyefektivní rezhimi yelektromekhaníchnoí sistemi nasosnoí ustanovki bagatopoverkhovogo budinku [Energy efficient modes electromechanical system pumping unit multistory building] Tehnichna Elektrodinamika. 2016, no. 5, pp. 38–45.
3. Popovych O.M. Matematychna model' dlya doslidzhennya rezhymiv asynkhronnykh mashyn elektromekhanotronnykh system [Mathematical model for the study of asynchronous machines elektromehanotronnyh systems] Pratsi IED NANU, 2010, vol. 25, pp. 89 – 97.
4. Popovych O. M. Matematychna model' asynkhronnoyi mashyny elektromekhanotronnoyi systemy dlya imitatsiynoho ta strukturnoho modelyuvannya. [Mathematical model of asynchronous electric machine for mechatronic system simulation and structural modeling] *Tekhnichna electrodynamika*. 2010, no. 4, pp. 25-32.
5. Popovych O.M., Holovan I.V. Utochnennya analizu rezhymiv roboty asynkhronnykh dvyhuniv u skladi elektromekhanotronnykh system ekvivalentuvannyam yikh pol'ovykh modeley kolovymy [Clarifying analysis modes of asynchronous motors consisting of elektromehanotronnyh equivalentiation field models of circular], *Tehnichna Elektrodinamika*. 2014, no. 5, pp. 113–115.
6. Radin V.I., Londin J., Rozenknop V.D. Unifitsirovannaya seriya asinkhronnykh dvigateley Interelektro [Unified series of induction motors Interelectro], Moscow: Energoatomizdat Publ, 1990, 416 p.

Надійшла (received) 12.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насосу за застосування комплексного проектування / О. М. Попович, О. В. Бібік // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 79–82. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Поиск и оценка путей повышения энергоэффективности моноблочного насоса при применении комплексного проектирования / А. Н. Попович, Е. В. Бибик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 79–82. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Search and evaluation of ways to increase the energy efficiency of a monoblock pump in the application of complex design / O.M. Popovych, O.V. Bibik // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 79–82. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Попович Олександр Миколайович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, провідний науковий співробітник, тел. (044)366-26-37; e-mail: popovich1955@ukr.net.

Попович Александр Николаевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, ведущий научный сотрудник, тел. (044)366-26-37; e-mail: popovich1955@ukr.net.

Popovych Oleksandr Mykolayovych, PhD, senior researcher, professor, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Research Fellow, tel. +38 (044)366-26-37; e-mail: popovich1955@ukr.net.

Бібік Олена Василівна, кандидат технічних наук, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, старший науковий співробітник, тел. (044)366-26-14; e-mail: bibik@ied.org.ua.

Бибик Елена Васильевна, кандидат технических наук, Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, старщий научный сотрудник, тел. (044)366-26-14; e-mail: bibik@ied.org.ua.

Bibik Olena Vasylivna, Ph.D., Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Fellow, tel. +38 (044)366-26-14; e-mail: bibik@ied.org.ua.

УДК 621.313.17

В. В. ГРЕБЕНИКОВ, М. В. ПРІЙМАК

ИССЛЕДОВАНИЕ МОТОР-КОЛЕСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ И РЕДУКТОРОМ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ С УЧЕТОМ ГОРОДСКОГО И ЗАГОРОДНЕГО ЕЗДОВЫХ ЦИКЛОВ

Наведено результати дослідження характеристик електродвигуна і редуктора з неодимовими магнітами для мотор-колеса електромобіля. Для заданих габаритів мотор-колеса з магнітним редуктором (зовнішній діаметр, осьова довжина електродвигуна і редуктора) визначена конфігурацію і розміри магнітної системи електродвигуна і редуктора, при якій досягається необхідне значення моменту в заданому діапазоні частоти обертання з урахуванням їздових циклів. Розрахунок характеристик досліджуваного електродвигуна і редуктора виконаний в програмному пакеті Infolytica MotorSolve і Magnet.

Ключові слова: мотор-колесо, електродвигун і редуктор на постійних магнітах, електромагнітний момент, робочі характеристики, чисельне моделювання, європейський їздовий цикл.

Приведены результаты исследования характеристик электродвигателя и редуктора с неодимовыми магнитами для мотор-колеса электромобиля. Для заданных габаритов мотор-колеса с магнитным редуктором (внешний диаметр, осевая длина электродвигателя и редуктора) определена конфигурацию и размеры магнитной системы электродвигателя и редуктора, при которой достигается требуемое значение момента в заданном диапазоне частоты вращения с учетом ездовых циклов. Расчет характеристик исследуемого электродвигателя и редуктора выполнен в программном пакете Infolytica MotorSolve и Magnet.

Ключевые слова: мотор-колесо, электродвигатель и редуктор на постоянных магнитах, электромагнитный момент, рабочие характеристики, численное моделирование, европейский ездовой цикл.

The results of a study of the characteristics of an electric motor and a gear with neodymium magnets for the motor- wheel of an electric vehicle are presented. The study of the traction characteristics of the motor-wheel for an electric vehicle was carried out taking into account the European driving cycle, which describes the movement of the vehicle in the city and in the countryside (engine operation in the minimum speed mode, starting and acceleration to a certain speed, braking from one speed to another). For the given dimensions of the motor-wheel with a magnetic gear (outer diameter, axial length of the electric motor and gear), the configuration and dimensions of the magnetic system of the electric motor and gearbox are determined, at which the required torque value is achieved within a given speed range, taking into account drive cycles. Calculation of the characteristics for the investigated electric motor and gear is made by the software package Infolytica MotorSolve and Magnet.

Keywords: motor-wheel, electric motor and gear with permanent magnets, electromagnetic torque, performance characteristics, numerical simulation, the European driving cycle.

Введение. В настоящее время наблюдается интенсивный рост продаж электромобилей. Рост мировых продаж в четвертом квартале 2017 года составил 23 % по сравнению со вторым кварталом 2017 года и 63 % – по сравнению с третьим кварталом 2016 года. Правительства многих стран заявили, что откажутся от продаж автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями, чтобы снизить выбросы вредных веществ в атмосферу и зависимость от нефтепродуктов. В связи с этим наблюдается рост инвестиций в развитие тяговых электродвигателей. Согласно прогнозам, в 2030 г. будет произведено 120 млн транспортных средств с электроприводом (включая скутеры, байки), и половина из них – электромобили, т. е. будет произведено более 60 млн тяговых электродвигателей [1].

Наряду с применением электродвигателей для электромобилей, устанавливаемых вместо дизельных или бензиновых двигателей также находят применение электрические мотор-колеса. Применение мотор-колес позволяет отказаться от коробки передач и главной механической передачи электромобиля, что значительно упрощает его кинематику и снижает его стоимость. Кроме того, в электротранспорте при использовании четырех мотор-колес можно реализовать самые сложные алгоритмы управления за счет раздельного управления скоростью и моментом каждого из двигателей мотор-колеса.

В иностранной и отечественной научно-технической литературе исследуются электродвигатели для мотор-колес с постоянными магнитами как цилиндрического типа [2, 3], так и аксиального (дискового) [4], а также на основе вентильно-индукторных электродвигателей [5, 6]. Каждый из указанных типов имеет свои преимущества и недостатки. В данной работе исследуется электродвигатель мотор-колеса с постоянными магнитами цилиндрического типа.

Анализ состояния вопроса. При проектировании мотор-колес для электромобилей следует учитывать ездовой цикл, который описывает движение транспортного средства в городе и за городом (работа двигателя в режиме минимальной частоты вращения, трогание с места и разгон до определенной скорости, торможение двигателем с одной скорости до другой). Европейский ездовой цикл NEDC (New European Driving Cycle) состоит из двух частей, первая часть цикла – городской ездовой цикл UDC (Urban Driving Cycle) состоит из четырёх одинаковых блоков каждый продолжительностью 195 сек. В соответствии с этом циклом транспортное средство на определенных участках разгоняется до скорости 18-32-50 км/час. Загородное движение описывается отдельным блоком EUDC (ExtraUrban Driving Cycle) продолжительностью 400 сек с чередованием скорости движения 70-50-100-120 км/час.

В качестве исходных данных при исследовании мотор-колес с магнитным редуктором приняты параметры автомобиля класса «стандарт», например, Skoda Octavia, Ford Focus: полная масса автомобиля – m = 1900 кг; коэффициент сопротивления воздуха для кузова шасси – C_x = 0,3; лобовая площадь кузова шасси – S = 2,1 м^2; радиус колес – r = 0,32 м; колесные диски – R16; коэффициент трения качения – f = 0,018.

© В.В. Гребеников, М.В. Пріймак, 2018

На автомобиль при движении действуют следующие силы: сила тяги ведущих колес, сила трения качения колес, сила сопротивления подъему, сила сопротивления воздуха, сила сопротивления разгону (сила инерции). С учетом приведенных исходных данных и сил, действующих на автомобиль при движении, определены частота вращения ротора и момент на валу двигателя.

На рис. 1 приведены зависимости частоты вращения колес и момента, необходимого для движения автомобиля согласно городского ездового цикла, рассчитанные при движении автомобиля в гору с углом наклона дороги α = 12 % и на прямолинейном участке дороги (α = 0 %). Согласно нормативных документов максимальный угол уклона дороги не должен превышать 12 %. Этот момент рассчитан исходя из условия, что коробка передач и главная передача отсутствуют. Анализируя кривые на рис. 1, следует отметить, что на одном из участков городского ездового цикла (t = 15−17,5 с) выполняется разгон до скорости 15 км/час за 2,5 сек. На этом участке при движении в гору с уклоном α =12 % необходим наибольший момент для движения автомобиля, равный $M_{(\alpha=12\%)}$ = 2000 Н·м, при движении с нулевым уклоном дороги (α =0 %), момент на этом участке должен быть в 1,6 раза меньше – $M_{(\alpha=0\%)}$ = 1300 Н·м. Частота вращения колес при скорости V = 15 км/час равна n = 124 об/мин.

На участках с постоянной скоростью при движении в гору с уклоном 12 % момент должен быть более, чем в 6,5−7,5 раз больше, чем при движении на прямолинейном участке: t = 17,5−22,5 с, V = 15 км/час, $M_{(\alpha=12\%)}$ = 890 Н·м, $M_{(\alpha=0\%)}$ = 119 Н··м, n = 124 об/мин; t = 142,5−157,5 с, V = 50 км/час $M_{(\alpha=12\%)}$ = 914 Н·м, $M_{(\alpha=0\%)}$ = 144 Н·м, n = 414 об/мин.

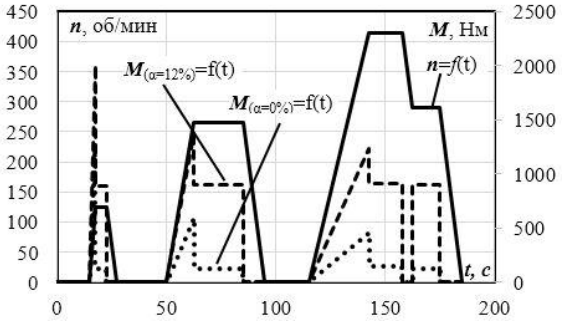


Рис. 1 – Зависимость момента, необходимого для движения автомобиля, и частоты вращения колес согласно городскому ездовому циклу

На рис. 2 приведены зависимости момента и частоты вращения для загородного ездового цикла. Для этого цикла пиковый момент равен $M_{(\alpha=12\%)}$ = 1305 Н·м на участке разгона t = 190−200 с.

Также для этого ездового цикла на участках с постоянной скоростью момент, необходимый для движения автомобиля, должен быть в 4−5,5 раз больше при движении в гору, чем при движении на участке с нулевым уклоном: t = 60−110 с, V =70 км/час, $M_{(\alpha=12\%)}$ = 940 Н·м, $M_{(\alpha=0\%)}$ = 170 Н·м, n = 580 об/мин; t = 335÷345 с, V = 120 км/час $M_{(\alpha=12\%)}$ = 1044 Н·м, $M_{(\alpha=0\%)}$ = 274 Н·м, n = 994 об/мин.

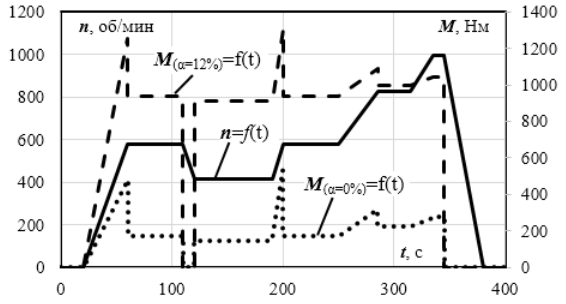


Рис. 2 – Зависимость момента, необходимого для движения автомобиля, и частоты вращения колес согласно загородному ездовому циклу

Если оснастить автомобиль четырьмя мотор-колесами, то на каждом из них должен быть момент вчетверо меньше, т.е., если на одном из участков городского цикла максимальный пиковый момент равен $M_{(\alpha=12\%)}$ = 2000 Н·м, то на каждом из мотор-колес должен быть момент $M_{MK(\alpha=12\%)}$ = 500 Н·м. Соответственно на одном из участков загороднего ездового цикла пиковый момент равен $M_{(\alpha=12\%)}$ = 1305 Н·м, значит момент на каждом из мотор-колес должен быть $M_{MK(\alpha=12\%)}$ = 326 Н·м. С учетом того, что частота вращения колес для рассматриваемых ездовых циклов находится в диапазоне n = 124−995 об/мин, то довольно трудно обеспечить без редуктора расчетные значения момента и частоты вращения в габаритах колесного диска R16. Поэтому для обеспечения необходимого момента и заданной частоты вращения мотор-колеса необходимо оснащать магнитным понижающим редуктором, т.е. главный редуктор и коробка передач заменяются магнитным редуктором, размещаемом в мотор-колесе.

В иностранной научно-технической литературе исследуются как электродвигатели мотор-колес с понижающим редукторами на постоянных магнитах [7, 8], так и отдельно редукторы с постоянными магнитами [9, 10].

Следует отметить, что исследованию характеристик мотор-колеса с электродвигателем и редуктором на постоянных магнитах с учетом городского и загороднего ездовых циклов не уделено достаточно внимания.

Цель исследований. Для заданных габаритов мотор-колеса с магнитным редуктором (внешний диаметр, осевая длина электродвигателя и редуктора) определить конфигурацию и размеры магнитной системы электродвигателя и редуктора, при которой достигается требуемое значение момента в заданном диапазоне частоты вращения с учетом городского и загороднего ездовых циклов.

Постановка задачи. При исследовании характеристик мотор-колеса с магнитнитным редуктором следует учитывать, что габариты определяются пространством, которое задается размерами диска R16. Чтобы мотор-колесо с редуктором разместилось в пространстве этого диска размеры должны быть не более: диаметр – 390 мм, аксиальная длина – 130 мм.

На рис. 3 упрощенно показана схема размещения электродвигателя с магнитным редуктором в диске R16 (без подшипников, подшипниковых щитов и обмоток двигателя).

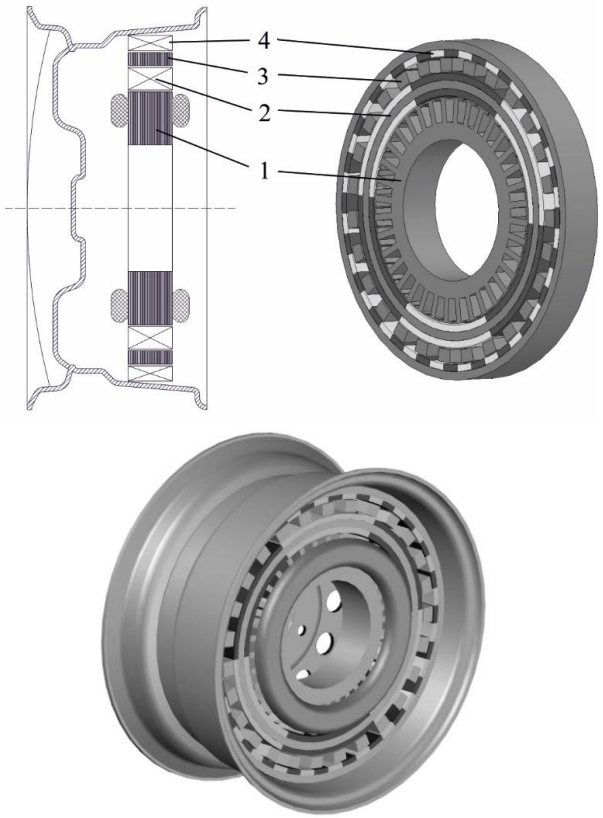


Рис. 3 – Схема размещения электродвигателя с магнитным редуктором в автомобильном диске R16.

На рис. 4 показана магнитная система исследуемой системы, которая состоит из статора электродвигателя *1*, внутреннего высокоскоростного ротора *2*, состоящего из двух слоев радиально намагниченных магнитов, неподвижных сегментов из электротехнической шихтованной стали *3*, внешнего низкоскоростного ротора с радиально намагниченными постоянными магнитами *4*, закрепленными на ферромагнитном замыкателе из конструкционной стали, который механически соединяется с диском колеса.

Конфигурация магнитной системы магнитных редукторов существенным образом влияет на их характеристики [7-10]. Передаточное отношение магнитного редуктора и число неподвижных ферромагнитных сегментов определяется соотношением между числом пар полюсов на низкоскоростном (внешнем) и высокоскоростном (внутреннем) роторе:

$$G_r = p_h/p_l;\ \omega_h = -G_r\,\omega_l;\quad n_s = p_l + p_h,$$

где G_r – передаточное отношение магнитного редуктора; p_l – число пар полюсов низкоскоростного ротора; p_h – число пар полюсов высокоскоростного ротора; n_s – число неподвижных стальных сегментов; ω_l – частота вращения низкоскоростного ротора; ω_h – частота вращения высокоскоростного ротора (низкоскоростной и высокоскоростной ротор вращаются в противоположных направлениях).

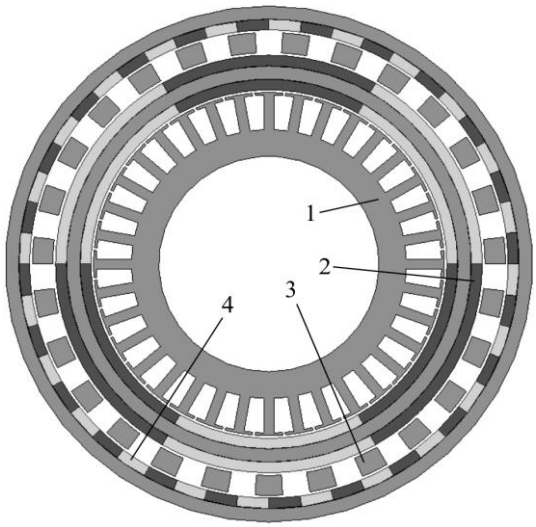


Рис. 4 – Общий вид электродвигателя с магнитным редуктором

Параметры исследуемого редуктора: толщина постоянных магнитов, высота неподвижных стальных сегментов, варьировались таким образом, чтобы обеспечить величину электромагнитного момента на внешнем низкоскоростном роторе не менее $M_{\text{МК}(\alpha=12\%)} = 500$ Н·м. При этом задавались неизменными следующие параметры: передаточное отношение редуктора – $G_r = 8$, число неподвижных стальных сегментов – $n_s = 27$, число пар полюсов низкоскоростного ротора – $p_l = 24$, число пар полюсов высокоскоростного ротора – $p_h = 3$, величина зазора между внешним ротором и стальными сегментами, а также между внутренним ротором и стальными сегментами – $\delta_{\text{ред}} = 2$ мм.

С учетом максимального значения электромагнитного момента для каждого мотор-колеса, равного $M_{\text{МК}(\alpha=12\%)} = 500$ Н·м и с учетом передаточного отношения магнитного редуктора, равного $G_r = 8$, значение электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем каждого мотор-колеса в диапазоне частоты вращения $n = 100 \div 8000$ об/мин должно быть не менее $M = 62.5$ Н·м.

Поэтому параметры исследуемого электродвигателя: размеры магнитной системы электродвигателя (внешний диаметр статора, внутренний диаметр статора, высота пазов статора, толщина зубцов статора, величина раскрытия паза статора, толщина магнитов); число витков обмоток статора варьировалось таким образом, чтобы обеспечить требуемое значение электромагнитного момента ($M = 62{,}5$ Н·м) в заданном диапазоне частоты вращения ($n = 100 - 8000$ об/мин) [11, 12]. Рабочий зазор задавался равным – $\delta = 2$ мм.

Результаты численного исследования. Для реализации поставленной цели на первом этапе производился расчет рабочих характеристик исследуемого электродвигателя с внешним ротором при следующих условиях: напряжение питания – 600 В; обмотки статора включены в «звезду»; форма питающего тока в фазах статора – синусоидальная; магнитопровод статора – сталь СТ2211; магнитопровод ротора – конст-

рукционная сталь СТ20; тип постоянных магниттов – 40SH; коэффициент заполнения обмоточного окна – 0,4.

В результате ряда расчетов путем варьирования геометрическими параметрами магнитной системы электродвигателя были определены оптимальные соотношения между внешним и внутренним диаметром статора, а также основные размеры магнитной системы, обеспечивающие с 10 % запасом значение электромагнитного момента (M = 70 Н·м) в диапазоне частоты вращения (n = 100−8000 об/мин).

На рис. 5 приведена картина магнитного поля в виде силовых линий электродвигателя мотор-колеса с магнитным редуктором для режима пиковой нагрузки.

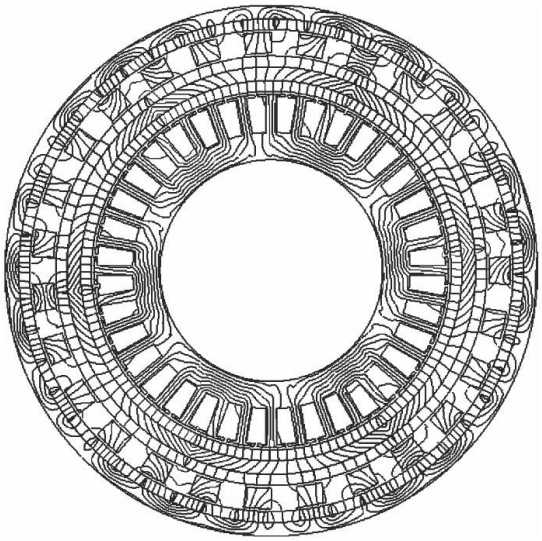


Рис. 5 – Магнитное поле электродвигателя мотор-колеса с магнитным редуктором в режиме пиковой нагрузки

Для электродвигателя также необходимо в результате численных экспериментов подобрать число витков обмоток статора, при котором обеспечивается максимальный электромагнитный момент в заданном диапазоне частоты вращения ротора. При значении числа витков в каждой катушке статора, равном w = 12, электромагнитный момент практически неизменен в заданном диапазоне частоты вращения ротора, его снижение начинается только при частоте вращения n = 8000 об/мин. Число катушек одной фазы статора – 12, соединение катушек одной фазы статора – параллельно-последовательное. Катушки объеденены в четыре последовательно соединенные группы, в каждой из которых три параллельно соединенные катушеки.

Рабочая характеристика электродвигателя, расчитанная в программном пакете Infolytica MotorSolve, приведена на рис. 6. На этом рисунке приведена расчетная зависимости электромагнитного момента электродвигателя $M = f(n)$ от частоты вращения ротора, а также приведены графики пиковых моментов для городского и загородного ездовых циклов. Результаты численных исследований рабочих характеристик показали, что при частоте вращения ротора равной n = 8000 об/мин электромагнитный момент равен M = 70 Н·м.

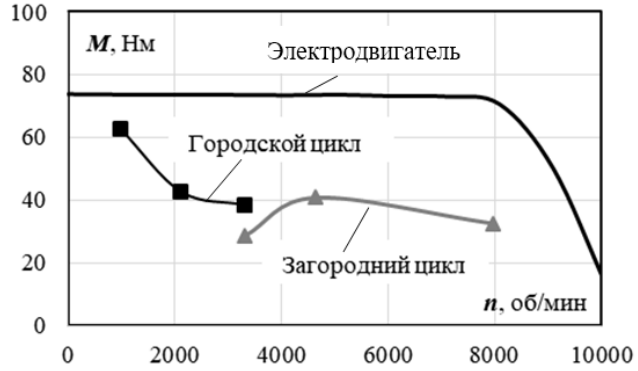


Рис. 6 – Рабочая характеристика электродвигателя и пиковые значения момента для европейского ездового цикла.

Чтобы получить значение электромагнитного момента, превышающие соответствующие пиковые значения момента городского ездового цикла у электродвигателя фазный ток должен быть равен I = 110 А, плотность тока при этом токе равная J = 7 А/мм^2. Для загородного ездового цикла максимальное пиковое значение момента составляет 41 Н·м. Поскольку в ездовом цикле пиковое значение момента требуется обеспечить лишь на отдельных участках этого цикла, то плотность тока может быть несколько завышена без опасности перегрева электродвигателя выше допустимого.

Таким образом, результаты расчета показывают, что проектирование электродвигателя для электромобиля должно осуществляется с учетом пиковых моментов ездового цикла.

На втором этапе определялись геометрические параметры магнитного редуктора путем вариации толщины магнитов и высоты неподвижных стальных сегментов с целью определения размеров, обеспечивающих максимальное значение момента на внешнем низкоскоростном роторе магнитного редуктора. Это значение момента должно быть с 10 % запасом не менее 550 Н·м, чтобы гарантировано обеспечить движение электромобиля согласно ездовых циклов.

На рис. 7 приведены зависимости максимального крутящего момента на внешнем низкоскоростном роторе магнитного редуктора от толщины постоянных магнитов и высоты стальных сегментов.

Геометрические параметры магнитного редуктора варьировались в следуещем диапазоне: высота стальных неподвижных сегментов – $h_{ст}$ = 5−20 мм; толщина постоянных магнитов на внешнем низкоскоростном роторе и внутреннем высокоскоростном роторе: $h_{ПМ}$ = 7−8 мм. Требуемое значение момента достигается при толщине постоянных магнитов $h_{ПМ}$ = 8 мм и высоте стальных неподвижных сегментов редуктора $h_{ст}$ = 15 мм.

Магнитные редукторы на постоянных магнитах, которые в отличии от механических редукторов не создают дополнительного шума, не требуют смазки,

долговечность работы у них выше. Особенностью такого редуктора является то, что при определенной величине нагрузки происходит выпадание из синхронизма (опрокидывание) ведомого ротора.

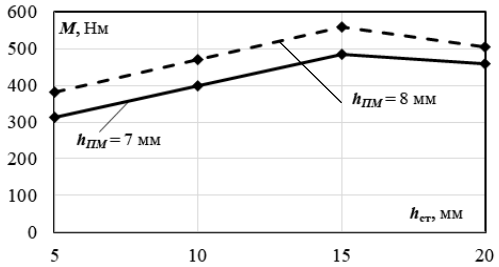


Рис. 7 – Зависимость максимального крутящего момента на внешнем роторе редуктора от толщины постоянных магнитов и высоты стальных сегментов

В отличие от механического редуктора в магнитном редукторе удается избежать механического разрушения или износа редуктора при его перегрузке. После снижения внешней нагрузки до допустимых пределов, ведомый ротор редуктора автоматически синхронизирует свою скорость с ведущим.

Магнитная система редуктора имеет два отдельно вращающихся ротора. Программный пакет Infolytica MagNet может использоваться для моделирования таких магнитно связанных движущихся систем. Моделировалось это следующим образом. Обмотки электродвигателя запитывались синусоидальным трехфазным током частотой, при которой скорость вращения ротора электродвигателя и соответственно внутреннего ротора редуктора была равной n = 8000 об/мин. Внешний ротор магнитного редуктора вращается при этом в противоположную сторону со скоростью n = 1000 об/мин. В этом моделировании постепенно увеличивалась нагрузка на внешнем роторе (движение в гору с уклоном α =12 %). Как и ожидалось, при определенном значении нагрузки внешний ротор опрокидывается (начинает проскальзывать).

На рис. 8 приведена зависимость скорости вращения внешнего ротора от времени при увеличении нагрузки. Как видно из графика при величине нагрузки равной $M_н$ = 530 Н·м резко уменьшается скорость вращения внешнего ротора, т.е. происходит его опрокидывание. Однако, как было определено выше, для электроиобиля заданных параметров (масса, лобовая площадь кузова, радиус колес и пр.) максимальное значение момента для одного мотор-колеса равно $M_{МК(α=12\%)}$ = 500 Н·м.

Основные технические параметры электродвигателя мотор-колеса и редукотра с постоянными магнитами приведены в табл. 1.

Таким образом, в результате численных исследований определены геометрические параметры электродвигателя мотор-колеса и магнитного понижающего редуктора, которые гарантированно обеспечат перемещения электромобиля на всех участках городского и загороднего ездовых циклов.

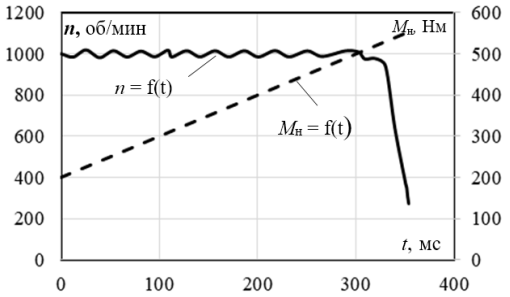


Рис. 8 – Зависимость частоты вращения внешнего ротора редуктора при увеличении нагрузки

Таблица 1– Основные технические параметры мотор-колеса с магнитным редуктором

Параметр	Значение
Число фаз элетродвигателя	3
Число пазов электродвигателя	36
Число пар полюсов внутреннго ротора	3
Число пар полюсов наружного ротора	24
Число неподвижных сегментов редуктора	27
Внешний диаметр статора электродвигателя, мм	258
Внутренний диаметр статора электродвигателя, мм	162
Число витков каждой катушки статора	12
Внешний диаметр внутреннего ротора редуктора, мм	314
Внешний диаметр наружного ротора редуктора, мм	388
Высота неподвижных стальных сегментов редуктора, мм	15
Аксиальная длина двигателя и редуктора, мм	50
Толщина магнитов электродвигателя и редуктора, мм	8
Рабочие зазоры, мм	2
Тип постоянных магнитов двигателя	N40SH
Тип постоянных магнитов редуктора	N40SH
Максимальная частота вращения внешнего ротора редуктора, об/мин	1000
Максимальный момент на внешнем роторе магнитного редуктора, Н·м	530
Максимальная частота вращения ротора электродвигателя, об/мин	8000
Максимальный момент электродвигателя, Н·м	70

Применение редуктора на постоянных магнитах, позволяет понизить частоту вращения мотор-колеса до необходимых значений, определяемых радиусом колеса и скоростью перемещения электромобиля в соотвветствии с европейским ездовым циклом. Оснащение электромобиля четырьмя мотор-колесами позволяет реализовать более гибкий алгоритм управления, чем в классическом случае за счет раздельного управления скоростью и моментом каждого из двигателей мотор-колеса. Кроме того, можно оснащать мотор-колесами существующие автомобили с бензиновым или дизельным двигателем и получать гибридное транспортное средство, которое, например, в городской черте перемещается только на электротяге, а за городом – используется двигатель внутреннего сгорания.

Выводы. 1. На стадии предварительного проектирования мотор-колеса для электромобиля с электродвигателем и редуктором на постоянных магнитах необходимо определять размеры магнитной системы с учетом массогабаритных параметров электромобиля, габаритов колесного диска и городского и загороднего ездовых циклов.

2. Для заданных габаритных размеров электродвигателя определены оптимальные размеры магнитной системы и толщина постоянных магнитов, при которых обеспечивается требуемое пиковое значение электромагнитного момента электродвигателя.

3. Для обеспечения гарантированного перемещения электромобиля с учетом ездового цикла, и максимального уклона дороги (α =12 %) электродвигатель должен оснащаться магнитным редуктором, который в отличии от механического редуктора не создает дополнительных шумов, не требует смазки, а значит, долговечность работы у него выше.

4. Магнитный редуктор, в отличии от механического, может проскальзывать (опрокидываться), если нагрузка на внешнем роторе превышает определенное значение. Проведено численное мооделирование совместной работы электродвигателя и магнитного редуктора и определены оптимальные размеры магнитной системы редуктора, при которых электромагнтный момент опрокидывания больше допустимого пикового момента при максимальном уклоне дороги.

Список литературы

Шумов Ю. Н. Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок) / *Ю. Н. Шумов, А. С. Сафронов.* // Электричество. – 2016. – №1. – С. 55–65.

Shihua Wu. Study on Improving the Performance of Permanent Magnet Wheel Motor for the Electric Vehicle Application / Shihua Wu, Liwei Song, Shumei Cui // IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. – vol. 43. – No. 1. – pp. 438-442.

Вершинин Д. В. Электропривод мотор-колеса электротранспортного средства /*Д.В. Вершинин, В.А. Войтенко, Е.А. Смотров и др.* // Электромашиностроение и электро-оборудование. – К.: Техника. – 2009. – Вып. 74. – С. 25-30.

Yee-Pien Yang. Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passenger Cars / *Yee-Pien Yang, Down Su Chuang* // IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. – vol. 43. – No. 1. – pp. 51-61

Lovatt H. C. Design procedure for low cost, low mass, direct drive, in-wheel motor drivetrains for electric and hybrid vehicles. / *H. C. Lovatt, D. Elton, L. Cahill and the others* // IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2011. – pp. 4405-4409.

Радимов И. Н. Сопоставительный анализ вентильных двигателей для электропривода мотор-колес легких транспортных средств / *И. Н. Радимов, В. В. Рымша* // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 3. – С. 42-44.

Chau K. T. Design of a Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Motor for Electric Vehicles / *K. T. Chau, Dong Zhang, J. Z. Jiang, Chunhua Liu, and Yuejin Zhang* / IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. – vol. 43, No. 6. – pp. 2504-2506.

Wang L.L. Development ofa Magnetic-GearedPermanent-MagnetBrushless Motor / *L. L. Wang, J. X. Shen, P. C. K. Luk and the others* // Transactions on Magnetics. – 2009. – vol. 43. – No. 10. – pp. 4578-4581.

Linni Jian A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays // *Linni Jian, K. T. Chau* // Ieee Transactions on Energy Conversion. – 2010. – vol. 25. – No. 2. – pp. 319-328.

Jian L. Optimum Design for Improving Modulating-Effect of Coaxial Magnetic Gear Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm // *L. Jian, G. Xu, J. Song and the others* // Progress In Electromagnetics Research. – 2011. – vol. 116. –pp. 297-312.

Гребеников В. В. Сравнительный анализ магнитных систем электродвигателей с постоянными магнитами для электробуса / *В. В. Гребеников, М. В. Прыймак* // Вісник НТУ «ХПІ»: Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2016 – Вип. 11 (1183). – С.42–48.

Гребеников В. В. Сравнительный анализ модификаций магнитной системы электродвигателя для электробуса / *В. В. Гребеников., П. Шымчак., М. В Приймак* // Праці ІЕД НАНУ: Зб. наук. пр., 2016. – Вип. 43. – С.48-53.

References (transliterated)

1. Shumov Yu. N., Safonov A. S. Energosberegayuschie elektricheskie mashinyi dlya privoda elektromobiley i gibridnyih avtomobiley (Obzor zarubezhnyih razrabotok) [Energy-Saving Electrical Machines for Driving Electric and Hybrid Vehicles (a Review of Foreign Developments)]. *Elektrichestvo*, 2016, no. 1. pp. 55–65.
2. Shihua Wu, Liwei Song, Shumei Cui. Study on Improving the Performance of Permanent Magnet Wheel Motor for the Electric Vehicle Application. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007, vol. 43, No. 1. – pp. 438-442.
3. Vershinin D.V., Vojtenko V.A., Smotrov E.A. i dr. Elektroprivod motor-kolesa `elektrotransportnogo sredstva [Electric drive motor-wheel electric vehicle]. Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie – K.: Tehnika. – 2009. – Vyp. 74. – S. 25-30.

Yee-Pien Yang, Down Su Chuang. Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passenger Cars. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007, vol. 43, No. 1, pp. 51-61.

Lovatt H. C., Elton D., Cahill L. and the others. Design procedure for low cost, low mass, direct drive, in-wheel motor drivetrains for electric and hybrid vehicles. *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2011, pp. 4405-4409.

Radimov I. N., Rymsha V. V. Sopostavitel'nyj analiz ventil'nyh dvigatelej dlja `elektroprivoda motor-koles legkih transportnyh sredstv [Comparative analysis of valve motors for the electric drive of motor-wheels of light vehicles] *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2005. – № 3. – S. 42-44.

Chau K. T., Dong Zhang, Jiang J. Z., Chunhua Liu, Yuejin Zhang. Design of a Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Motor for Electric Vehicles. *IEEE* Transactions on Magnetics. 2007, vol. 43, No. 6, pp. 2504-2506.

Wang L.L., Shen J. X., Luk P. C. K and the others. Development ofa Magnetic-GearedPermanent-MagnetBrushless Motor. *Transactions on Magnetics*. 2009, vol. 43, No. 10, pp. 4578-4581.

Linni Jian, Chau K. T. A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays. *Ieee Transactions on Energy Conversion*. 2010, vol. 25, No. 2, pp. 319-328.

Jian L., Xu G., Song J. and the others. Optimum Design for Improving Modulating-Effect of Coaxial Magnetic Gear Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm. *Progress In Electromagnetics Research*. 2011, vol. 116, pp. 297-312.

Grebenikov V. V. Pryjmak M.V. Sravnitel'nyj analiz magnitnyh sistem jelektrodvigatelej s postojannymi magnitami dlja jelektrobusa [Comparative analysis of magnetic systems of electric motors with permanent magnets for electric bus] Visnyk *NTU* «KhPI»: Ser: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennya enerhiyi, 2016, vol. 11(1183), pp. 42–48

Grebenikov V. V. Shymchak P., Priymak M. V. Sravnitel'nyy analiz modifikatsiy magnitnoy sistemy elektrodvigatelya dlya elektrobusa [Influence of liquid cooling on characteristics of electric machine with permanent magnets] Pratsí ÍED NANU: Zb. nauk. pr., 2016, vip. 43, pp. 48-53.

Поступила (received) 12.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження мотор-колеса для електромобіля з електродвигуном і редуктором на постійних магнітах з урахуванням міського та заміського їздових циклів // В. В. Гребеніков, М. В. Приймак // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 83–89. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2409-9295.

Исследование мотор-колеса для электромобиля с электродвигателем и редуктором на постоянных магнитах с учетом городского и загородного ездовых циклов // В. В. Гребеников, М. В. Прыймак // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 83–89. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2409-9295.

Study of a motor-wheel for an electric vehicle with an electric motor and a gear with permanent magnets, taking into account urban and countryside driving cycles // V. V. Grebrnikov, M. V. Priymak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 83–89. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гребеніков Віктор Володимирович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ; тел. (067) 441-73-72; e-mail: elm1153@gmail.com.

Гребеников Виктор Владимирович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт электродинамики национальной академии наук Украины; г. Киев; тел. (067) 441-73-72; e-mail: elm1153@gmail.com.

Grebenikov Viktor Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Leading Reseacher, the Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel. (067) 441-73-72; e-mail: elm1153@gmail.com.

Приймак Максим Васильович - Інженер 1 категорії, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ; тел. (044) 366-26-66; maksim.prv@gmail.com

Прыймак Максим Васильевич – Инженер 1 категории, Институт электродинамики национальной академии наук Украины, г. Киев; тел. (044) 366-26-66; e-mail: maksim.prv@gmail.com

Pryjmak Maxim Vasilevich – engineer 1 category, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel. (044) 366-26-66; e-mail: maksim.prv@gmail.com

УДК 621.3.048.13

М. А. ПОЛЯКОВ, И. А. АНДРИЯС, С. П. КОНОГРАЙ, В. В. ВАСИЛЕВСКИЙ

КОГНИТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК МАСЛОНАПОЛНЕННОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Рассмотрена многоуровневая структура системы управления жизненным циклом изоляции обмоток маслонаполненного силового трансформатора, которая состоит из базы знаний и подсистем познания, когнитивности и деятельности. Впервые предложены теоретико-множественные модели баз знаний в формах от данных до мудрости, модели уровней деятельности от целевого до уровня управления операцией. Построение системы управления жизненным циклом изоляции обмоток силовых трансформаторов с использованием когнитивных возможностей уменьшает требования к квалификации оператора системы и исключает повышение расхода ресурса изоляции, связанного с ошибками оператора.

Ключевые слова: силовой трансформатор, изоляция обмоток, система непрерывного контроля, жизненный цикл, когнитивное управление.

Розглянуто багаторівнева структура системи управління життєвим циклом ізоляції обмоток маслонаповненого силового трансформатора, яка складається з складається з бази знань і підсистем пізнання, когнітивності і діяльності. Вперше запропоновано теоретико-множинні моделі баз знань в формах від даних до мудрості, моделі рівнів діяльності від цільового до рівня управління операцією. Побудова системи управління життєвим циклом ізоляції обмоток силових трансформаторів з використанням когнітивних можливостей зменшує вимоги до кваліфікації оператора системи і виключає підвищення витрати ресурсу ізоляції, пов'язаної з помилками оператора.

Ключові слова: силовий трансформатор, ізоляція обмоток, система неперервного контролю, життєвий цикл, когнітивне управління.

Purpose. The purpose of the article is to reduce the complexity of designing life-cycle control systems for power transformers windings insulation based on the use of typical functional structures and elements of cognitive control systems. **Methodology.** We have applied concepts cognitive control systems, graph theory, and mathematical modeling. **Results.** We have obtained a multi-level structure of the life-cycle control system of an oil-immersed power transformers winding insulation, which consists of a knowledge base and subsystems of knowledge, cognition and activity. The data base is built on the principle of the DIKUW knowledge form pyramid and contains the knowledge accumulated and processed during the monitoring of the transformer parameters. The knowledge subsystem consists of converters of some forms of knowledge into others, beginning with signals and ending with wisdom. The subsystem of activity includes a hierarchical structure of finite state machines providing target management, adaptive scenarios for achieving the goal, flexible behavior management in operations affecting the resource consumption of isolation. **Originality.** For the first time, we have established a set-theoretic models of knowledge bases in the forms from data to wisdom, models of activity levels from the target to the level of operation management. **Practical value.** The construction of a control system for the winding insulation cycle of power transformers using cognitive capabilities reduces the requirements for the qualification of the operator of the system and the increased consumption of the isolation resource associated with operator errors.

Key words: power transformer, insulation of windings, online monitoring system, life cycle, cognitive management.

Введение. Силовой трансформатор (СТ) это есть сложная и дорогостоящая электромеханическая система, часть элементов которой заменяются после отработки своего ресурса в процессе эксплуатации. В то же время, такой элемент СТ как изоляция обмоток (ИО) имеет не возобновляемый ресурс, так как стоимость его замены является экономически нецелесообразной [1].

Ресурс ИО СТ – это характеристика применения СТ, поэтому расход ресурса зависит от многих факторов, которые изменяются в процессе эксплуатации. Например, температура и влажность бумажной изоляции и трансформаторного масла и другие [2, 3, 4].

Управление текущими значениями некоторых параметров, с целью уменьшения расхода ресурса ИО СТ, возможно с задействованием системы управления охлаждением. Управляющее воздействие на трансформатор определяется на основе информации, полученной от первичных датчиков и/или системы непрерывного контроля (СНК), которую часто называют системой мониторинга [5, 6, 7]. СНК выполняют измерения текущих значений параметров первичной сети, нагрузки, окружающей среды и самого СТ. Результаты измерений сохраняются на машинном носителе и используются для расчета вторичных параметров и визуализации этой информации в форме удобной для восприятия оператором. Информация от СНК используется также для прогнозирования технического состояния СТ [8, 9] и управления жизненным циклом СТ [10, 11].

Таким образом, эффективность управления жизненным циклом (ЖЦ) ИО СТ зависит от содержания и объема знаний о его техническом состоянии и методах его прогнозирования.

Анализ исследований. Роль знаний в ускорении научно – технического прогресса мировой экономики такова, что возник термин «когнитивная революция». Прогнозируется, что в ближайшие десятилетия человека будут окружать искусственные интеллектуальные системы, функционирующие на основе знаний. Применительно к системам управления предложен термин «когнитивные системы управления» (КСУ) [12].

Функциональные структуры таких КСУ содержат ряд уровней, на которых происходит изменение формы знаний, приобретенных системой, и детализация ее деятельности [13]. Формы знаний, используемых в КСУ, описываются пирамидами форм знаний DIKW [14] или DIKUW (Data (Данные) – Information (Информация) – Knowledge (Знания) – Understanding (Понимание) - Wisdom (Мудрость)). А формы деятельности - пирамидой TSBOD (Target (Цель) – Scenario (Сценарий) – Behavior (Поведение) – Operation (Операция) – Data (Данные)).

С точки зрения форм знаний известные СНК СТ являются автоматизированными информационно – управляющими системами. В них в основном используются знания оператора уровней «данные», «инфор-

© М.А. Поляков, И.А. Андрияс, С.П. Конограй, В.В. Василевский, 2018

мация», а деятельность относится к уровням «поведение», «операция», «данные». Знания более высоких уровней («знание», «понимание» и «мудрость») и действия для анализа полученной СНК информации , выбора целей функционирования СТ и СНК, сценариев достижения выбранных целей, рационального поведения системы управления в рамках выбранного сценария и другие обрабатываются в контуре «СНК - оператор». То есть когнитивные функции в системе выполняет человек, что связано с высокими требованиями к квалификации оператора и вероятностью принятия не оптимальных решений.

В доступной авторам литературе не описаны структуры когнитивных систем управления применительно к системам управления ЖЦ ИО СТ, что затрудняет их проектирование и выбор.

Целью работы является уменьшение трудоемкости проектирования систем управления ЖЦ ИО СТ на основе использования типовых функциональных структур и элементов КСУ.

Задачей работы является разработка теоретико-множественных моделей элементов и структур таких систем управления.

Функциональная структура когнитивной системы управления ЖЦ ИО СТ. Как отмечено в [1] ресурс ИО закладывается на этапе проектирования СТ, материализуется в процессе изготовления (здесь возможно некоторое уменьшение ресурса относительно запланированного в процессе проектирования из-за несовершенства технологических процессов изготовления) и расходуется в процессе эксплуатации.

У КСУ есть два механизма воздействия на скорость расхода ресурса:

1. Изменять температуру изоляции, управляя охлаждением трансформатора.

2. Выполнять техническое обслуживание изоляции в составе СТ (сушка, замена масла и др.).

Когнитивность системы управления заключается в обосновании этих воздействий на основе имеющихся в системе управления знаний об объекте управления, окружающей среде и целей функционирования КСУ. Эти цели могут вступать в конфликт друг с другом и изменяться в ходе эксплуатации СТ. Примерами таких целей могут служить:

Цель 1. Максимально увеличить срок службы ИО.

Цель 2. Увеличить срок службы ИО за счет улучшения охлаждения СТ и технического обслуживания ИО и трансформаторного масла.

Цель 3. Максимизировать доход от эксплуатации СТ.

Цель 4. Обеспечить работоспособность СТ при любых значениях тока нагрузки игнорируя повышенный расход ресурса ИО.

Цель 5. Предотвратить аварию СТ из-за пробоя ИО.

Кроме того следует учитывать, что выбранная (текущая) цель может быть достигнута различными способами, которые описываются соответствующими сценариями. Например, для предотвращения аварии можно направить деятельность системы на уменьшение температуры наиболее нагретой точки изоляции, а можно уменьшить влажность бумаги, из которой изготовлена ИО.

Таким образом, в функции КСУ входит получение знаний, их когнитивная обработка и формирование воздействий на объект управления. Схема функциональной структуры КСУ ЖЦ ИО СТ приведена на рис. 1.

Теоретико-множественная модель функциональной структуры это кортеж

$$<Si, MDB, K, C, A>, \quad (1)$$

где Si – модель сигналов;

MDB – модель базы данных;

K – модель подсистемы познания;

C – модель подсистемы когнитивности;

A – модель подсистемы деятельности.

В модели Si содержится информация о типе (дискретный, аналоговый), направлении передачи (входной, выходной) и параметрах (ток, напряжение и др.) сигналов.

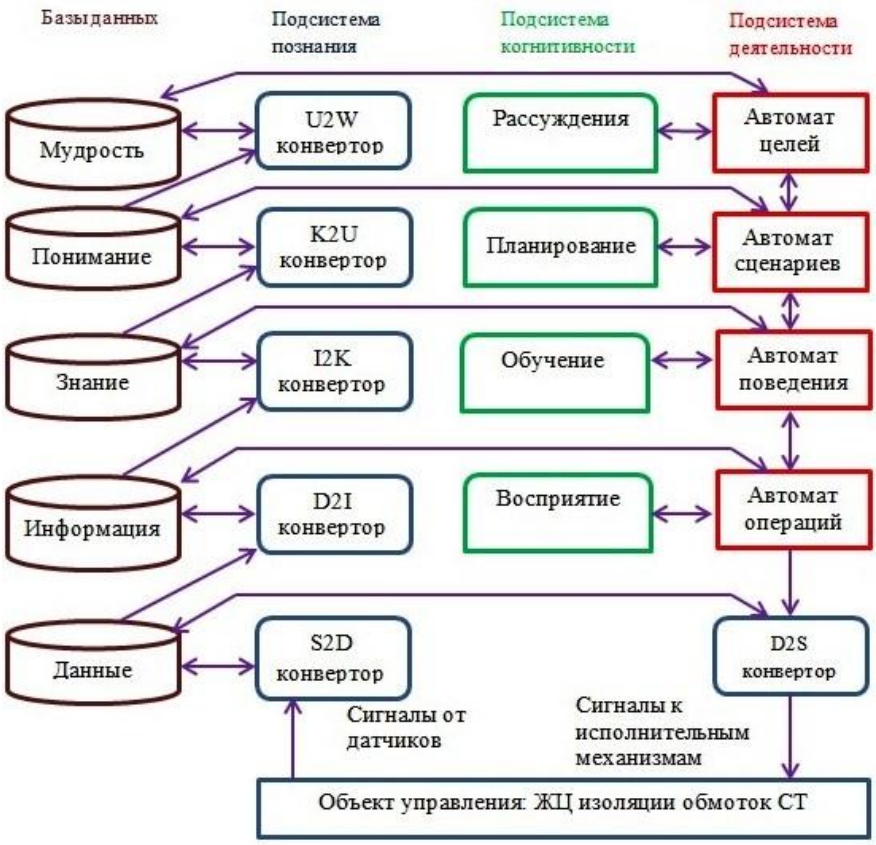


Рис. 1 – Структурная схема функциональной структуры КСУ ЖЦ ИО СТ

Модель MDB задает структуру баз данных на различных уровнях форм знаний:

MDB = {D, I, K, U, W}, (2)

где D – структура базы знаний в форме данных;

I, K, U, W – структура базы информации, знаний, пониманий и мудрости, соответственно.

Запись в базе D имеет поля числовых значений кода одного или нескольких сигналов и кода системного времени в момент записи сигнала.

Запись в базе I имеет поля наименования параметра объекта управления, окружающей среды или вторичного параметра (например, среднее значение в массиве величин), значение, погрешность измерения, единицы измерения, значения атрибутов астрономического времени в момент записи сигнала – источника информации.

Структура записей в базе K зависит от типа знаний. Это могут быть наименования знаний и результаты:

сравнения (например, наименование - «входной ток превысил допустимое значение», результат – «истина»);

аппроксимации (например, наименование «суточные колебания температуры окружающей среды описываются синусоидой с параметрами..»);

определения тенденций (например, наименование «среднесуточный расход ресурса изоляции устойчиво возрастает в течение недели»);

выявления корреляций (например, наименование «с ростом температуры масла уменьшается влажность бумажной изоляции»);

определения значений лингвистических переменных, которые задаются наименованием, областью определения, терм множеством, нечетким множеством для каждого терма, значением и другими параметрами (например, наименование терма «Аварийная нагрузка» лингвистической переменной «Ток нагрузки»; значение степени принадлежности равна 0.4)

Структура записей в базах U и W аналогична структуре в базе K. Каждая запись в базах U и W также содержит поля наименования знаний и оценки его истинности. Отличия этих баз заключаются в семантике знаний.

Знания в базе U отображают отношения, в том числе нечеткие продукции между различными знаниями из базы K, а также отношения между знаниями из базы K и значениями входов автоматов сценариев подсистемы деятельности. В последнем случае истинность знаний вычисляется с помощью конвертора K2U, без привлечения блоков подсистемы когнитивности. Пример наименования знания: из базы U: «ЕСЛИ «тенденция роста температуры изоляции сохраняется» ТО «в ближайшие сутки возможен пробой изоляции»».

Знания в базе W отображают отношения между различными знаниями из баз U, K и между этими знаниями и значениями входов автомата целей подсистемы деятельности. Эти знания вычисляются с помощью конвертора U2W. Пример наименования знания: из базы W: «ЕСЛИ «сохранится такая большая скорость расхода ресурса изоляции» ТО «цель сохранения работоспособности СТ в пределах назначенного интервала времени становится недостижимой».

Кроме того базы K, U и W могут содержать процедурные знания, которые задаются наименованием и полями элементов представляющего это знание конечного автомата входами, выходами, состояниями, таблицами переходов и выходов.

Подсистема познания, представленная на рис.1 конверторами описывается моделью:

K = {S2D, D2I, I_12I_2, I2K, K_12K_2, K2U, U_12U_2, U2W, D2S},

где в скобках перечислены обозначения конверторов знаний, которые рассмотрены ниже.

Знания поступают в подсистему познания в форме сигналов от первичных датчиков параметров окружающей среды, первичной сети и нагрузки СТ и самого СТ, а также в форме сообщений по сети с информацией от интеллектуальных информационно – измерительных приборов.

Конвертор сигналов в данные (в английской нотации “Signal to Data”, S2D) преобразует эти сигналы в электрическую форму, выполняет аналоговую фильтрацию, выполняет аналогово-цифровое преобразование и сохраняет код каждого сигнала вместе с кодом системного времени момента фиксации сигнала в базе данных. При необходимости, выполняется цифровая фильтрация сигналов. Неэлектрическая, например, оптическая, форма сигналов используется для передачи сигналов от сенсоров в условиях сильных электромагнитных полей в СТ.

Конвертор данных в информацию (D2I) проводит расшифровку данных с учетом схемы подключения конвертора сигналов к датчикам, моделей датчиков и режимов аналогово-цифрового преобразования. Код системного времени преобразуется к астрономическому времени и синхронизируется со временем узла системы обладающего вычислительным ресурсом (промышленного компьютера или программируемого контроллера). При этом определяется (оценивается) погрешность полученной информации. К информации, полученной из БД, добавляется полученная по сети информация от интеллектуальных информационно - измерительных приборов. Примерами таких приборов могут служить анализаторы параметров электрической сети, анализаторы параметров влажности и хроматического анализа газов в трансформаторном масле. К информации, полученной системой управления добавляется результаты моделирования. Это позволяет при конвертации информации в знания учитывать значения ненаблюдаемых параметров.

Конвертор I_12I_2 (не показан на рис.1) преобразовывает первичную информацию во вторичную. В результате преобразования определяется среднее, максимальное, минимальное, наиболее вероятное значение, координаты центров кластеров векторов анализируемых величин, тенденции их изменения, относительные скорости старения изоляции и другие результаты обработки.

Конвертор информации в знания (I2K) выполняет процедуры сравнения, аппроксимации, нахождения корреляций, определения тенденций и другие опера-

ции обработки информации, которая хранится в базе информации. Результатом этой обработки являются знания в форме суждений. Например, «величина X входит/не входит в диапазон Y (соответствует/не соответствует норме)», «тег X перешел в состоянии тревоги третьей степени в момент времени t».

Конвертор $K_1 2 K_2$ получает вторичные знания из первичных с использованием процедур логического программирования. Например [15], с помощью системы логического вывода на основе языка Пролог можно выявить противоречивость следующего набора знаний о тенденциях изменения комплекса взаимосвязанных параметров: нагрузка СТ - растет, температура окружающей среды - увеличивается, температура масла – уменьшается, время охлаждения – уменьшается.

Конвертор знаний в понимания (K2U) выполняет поиск взаимосвязей в приобретенных знаниях. С этой целью проводится обработка множества накопленных знаний с помощью процедур логического вывода. В результате этих процедур находятся нечеткие продукции, отражающие взаимосвязи между знаниями и воздействиями подсистемы деятельности на объект управления.

Конвертор $U_1 2 U_2$ анализирует систему продукций первичных пониманий в базе U. При этом также используются процедуры логического программирования.

Конвертор U2W определяет степень истинности входов конечного автомата целей подсистемы деятельности. При этом используются инструменты логического программирования для обработки знаний в базе понимания

Конвертор D2S преобразует данные воздействий на объект управления в параметры (токи, напряжения и т.п.) сигналов управления.

Теоретико-множественные модели конверторов подсистемы познания приведены в [13].

Подсистема когнитивности выполняет в системе управления те же задачи, что и подсистема познания – обеспечение знаниями подсистемы деятельности. Но, если проводить аналогию действий системы управления с процессами мышления в мозге, то подсистема познания отражает «бессознательное», жестко запрограммированное получение знаний, а подсистема когнитивности моделирует сознательные, когнитивные возможности мозга.

Теоретико-множественная модель подсистемы когнитивности содержит модели когнитивных способностей:

$$C = \{Re, Pl, Tr, Pe\}, \quad (3)$$

где Re – рассуждения (reasoning);
Pl – планирование (planning);
Tr – обучение (training);
Pe – восприятие (perception).

Предметом рассуждений в КСУ ЖЦ ИО СТ служат цели ее функционирования. Анализ достижимости этих целей связан с поиском «за» и «против» сценариев их реализации. Результатом рассуждения является выбор текущей цели. Таким образом, модель рассуждения может быть представлена в виде:

$$Re = \{ Sub, Rea, Res \}, \quad (4)$$

где Sub – тема (subject);
Rea – доводы (reasons);
Res – результат (result).

Причем методы нахождения доводов определяют содержательность блока рассуждений. Например, пусть темой рассуждения выбрано уменьшение скорости старения изоляции путем удаления влаги из бумаги методом сушки. Доводы «за»: меньший расход ресурса изоляции после операции сушки. Доводы «против»: во время сушки расходуется ресурс изоляции; выполнение операции потребует затрат и связано с выводом СТ из эксплуатации. Результат рассуждений это есть решение системы управления, подтверждающее текущую цель, например «не отключать трансформатор» или решение о переходе к цели «уменьшить скорость старения путем сушки». Это решение оформляется как текущее значение входа автомата целей подсистемы деятельности.

В данном примере рассуждений доводы формируются относительно некоторых событий в будущем, что возможно в том случае, если исполняется другой блок когнитивной подсистемы – блок планирования. Модель планирования может быть представлена в виде:

$$Pl = \{KM, OM, PM\}, \quad (5)$$

где KM – модель входных знаний (knowledge model);
OM – модель объекта или процесса планирования (object model);
PM – модель результата планирования (planing model).

Например модель планирования расхода ресурса на следующие сутки может иметь параметры: KM – знания о прогнозах суточных циклах нагрузки СТ и температуры окружающей среды; OM – термодинамическая модель СТ, влагодинамическая модель бумажно-масляной изоляции, динамическая модель кислотности масла; PM – параметры «интеграла старения» изоляции СТ.

Из приведенного примера видно, что в ходе планирования требуются знания о прогнозируемых процессах в объекте управления. Эти знания могут быть получены в результате работы блока обучения подсистемы когнитивности. Модель блока обучения может быть представлена в виде:

$$Tr = \{MK, TT, TM \}, \quad (6)$$

где MK – результаты мониторинга процесса управления (monitoring knowledge) – знания о динамике его входных и выходных параметров;
TT – средства обучения (training tools);
TM – модель процесса (training model).

Например, пусть MK это массив среднечасовых токов нагрузки СТ, TT – средство anfisedit из пакета Матлаб. ANFIS (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System) - адаптивная сеть, функционально эквивалентная системе нечёткого вывода. Тогда TM – нечеткая модель прогнозируемого значения тока.

При определении блока восприятия подсистемы когнитивности будем придерживаться трактовки восприятия как процесса категоризации воспринимаемо-

го, то есть отнесения воспринимаемых предметов к тому или иному классу (категории) объектов. Модель блока восприятия может быть представлена в виде:

$$Pe = \{PSO, PT, CL\}, \quad (7)$$

где PSO – параметры множества объектов (parameters of a set of objects);

PT – инструменты восприятия (perception tools);

CL – кластер (cluster) воспринимаемого объекта. Например, PSO – параметры суточных графиков токов нагрузки за некоторый период;

PT – процедуры кластеризации fcm, findcluster из пакета Матлаб; CL – степень принадлежности данного объекта кластерам «рабочий день», «выходной» и др.

Подсистема деятельности является потребителем знаний, добытых подсистемами познания и когнитивности. Она содержит иерархию управлений в виде управляющих автоматов целей, сценариев, поведения и операций (см. рис. 1). Модели управляющих автоматов описываются кортежами входов, выходов, состояний, функций переходов и выходов. Действия выходов вышестоящего автомата могут активизировать нижестоящий автомат, изменить его параметры и функции. Выходы нижестоящего автомата могут быть входами вышестоящего. Например, модель дискретного автомата целей имеет вид:

$$FSM^t = <X^t, Y^t, S^t, \mu^t, \delta^t>, \quad (8)$$

где X^t – множество дискретных (принимающих одно из двух возможных значений) входов;

Y^t – множество выходов;

S^t – множество состояний;

μ^t – функция выходов;

δ^t – функция переходов.

Пример автомата целей 1 - 5 сформулированных выше приведен на рис. 2 в виде графа автомата.

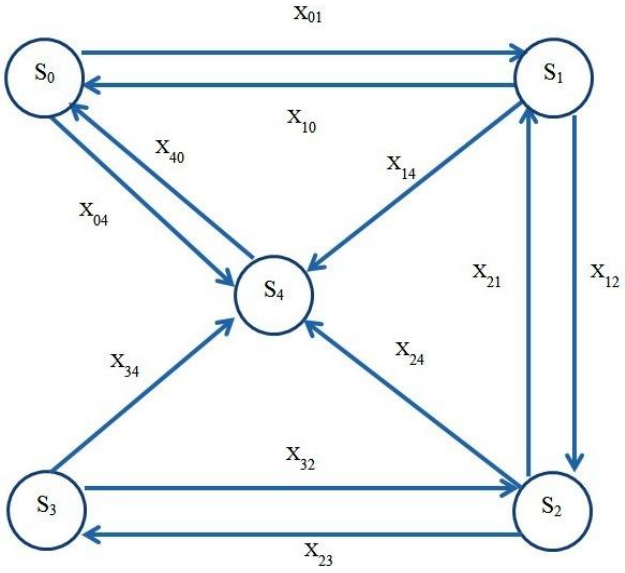


Рис. 2 – Пример графа автомата целей

Состояния S0-S4 на рис. 2 соответствуют целям 1-5 описанным выше. Условия переходов имеют следующие значения: X_{01} – недостаточно ресурсов для выполнения цели 1; X_{12} – доход от эксплуатации СТ перекрывает потери от сокращения срока службы ИО; X_{23} – непрерывность энергоснабжения важнее увеличения доходов; X_{04}, X_{14}, X_{24}, X_{34}, - предотвращение аварии важнее, чем достижение целей 1 – 4, соответственно; X_{40} –авария маловероятна; $X_{10} = !X_{01}$, $X_{21} = !X_{12}$, $X_{32} = !X_{23}$, где «!» - знак инверсии условия. Каждому состоянию соответствует один выход, который активизирует соответствующий автомат сценария достижения цели. Эти выходы не показаны на рис. 2.

Модели других автоматов подсистемы деятельности по структуре аналогичны рассмотренному выше автомату целей.Выводы.

1. Управление жизненным циклом ИО СТ связано с получением и интеллектуальной обработкой значительного количества знаний выраженных в различных формах. Поэтому такое управление реализуется с помощью когнитивных систем.

2. Когнитивная система управления жизненным циклом ИО СТ состоит из базы знаний и подсистем познания, когнитивности и деятельности.

3. База знаний построена по принципу пирамиды форм знаний DIKUW и содержит знания, накопленные и обработанные в процессе мониторинга параметров СТ.

4. Подсистема познания состоит из конверторов одних форм знаний в другие, начиная от сигналов и заканчивая мудростью. Эта подсистема «бессознательно» накапливает знания, которые используются для управления.

5. Алгоритмы блоков подсистемы когнитивности моделируют такие способности человеческого мозга как рассуждения, планирование, обучение и восприятие

6. Подсистема деятельности включает иерархическую структуру конечных автоматов обеспечивающих целевое управление, адаптивные сценарии достижения цели, гибкое управление поведением в операциях воздействия на расход ресурса изоляции.

7. Построение системы управления ЖЦ ИО СТ с использованием когнитивных возможностей уменьшает требования к квалификации оператора системы и повышенный расход ресурса изоляции, связанный с ошибками оператора

8. Предложенные теоретико-множественные модели элементов системы управления ЖЦ ИО СТ упрощают проектирование таких систем. Потенциально могут быть использованы при совершенствовании систем непрерывного контроля ООО «Энергоавтоматизация».

Список литературы

1. Поляков М. А., Василевский В. В. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation // Технічна електродинаміка – 2014. – № 5. – С. 65-67.
2. Василевский В. В. Оценка расхода ресурса бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения / Василевский В. В. // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 1. – С. 18-21.
3. Поляков М. А., Климов С. И. Методы и информационные технологии обработки данных мониторных параметров силового трансформатора // Електроенергетичні та електромеханічні системи Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 637. – С. 70-73.

4. Martin D. Improving the determination of water content of power transformer insulation paper near the end of its functional life // 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, QLD. – 2016. – pp. 1-6. **doi: 10.1109/AUPEC.2016.7749280.**
5. Рассальский А. Н. Системы мониторинга силовых трансформаторов // Електротехніка і Електромеханіка. – 2003. – № 3. – С. 40-43.
6. Василевский В. В. Автоматизация оценки ресурса бумажной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов на разных стадиях жизненного цикла // В. В. Василевский, М. А. Поляков // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2015. – № 3. – С. 110-116.
7. Андриенко П. Д. Особенности непрерывного контроля характеристик влагосодержания изоляции маслонаполненного электрооборудования / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно, С. П. Конограй, Л. С. Скрупская // Електротехніка та електроенергетика. –2014. – № 2. – С. 32-40.
8. Андриенко П. Д. Определение нагрузочной способности силовых трансформаторов с использованием систем непрерывного контроля и стохастической оптимизации / П. Д. Андриенко, С. П. Конограй // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – № 19. – С. 119-124.
9. Поляков М. А От мониторинга параметров – к мониторингу состояний силового трансформатора // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №1. – С.49-52.
10. Eva Müllerová Life Cycle Management of Power Transformers: Results and Discussion of Case Studies / Eva Müllerová, Jan Hrůza, Jiří Velek, Ivo Ullman, František Stříska // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – Vol. 22, No. 4. – August 2015. – pp. 2379 - 2389.
11. Ballal M. S. Online condition monitoring system for substation and service transformers / M. S. Ballal, G. C. Jaiswal, D. R. Tutkane, P. A. Venikar, M. K. Mishra and H. M. Suryawanshi // IET Electric Power Applications. – 2017. – vol. 11, no. 7. – pp. 1187-1195. **doi: 10.1049/iet-epa.2016.0842.**
12. Поляков М. А. Теоретико-множественные модели функциональных структур систем когнитивного управления // Системные технологии. – 2017. – № 3(110). – С. 16-23.
13. Поляков М. А. Когнитивные системы управления: структуры и модели // Электротехнические и компьютерные системы. – 2017. – № 25(101). – С. 387-393.
14. Rowley J. The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy // Journal of Information and Communication Science. – 2007. – 33 (2). – pp. 163-180. **doi: 10.1177 / 0165551506070706.**
15. Poliakov M., Morshchavka S., Lozovenko O. Training in Research on Cognitive Control Systems // In proceeding of 20th International Conference on Interactive Collaborative Learnig (ICL2017, 27-29 September 2017, Budapest, Hungary). – 2017. – pp. 432–441.

References (transliterated)

1. Poliakov M. A., Vasilevskij V. V. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation. *Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics*, 2014, № 5, pp. 65-67.
2. Vasilevskij V. V. Otsenka raskhoda resursa bumazhnoi izoliatsii silovogo maslonapolnennogo transformatora s pomoshch'iu utochnennoi formuly integrala stareniia [Evaluation of the resource consumption of oil-immersed power transformers paper insulation basing on updated aging integral] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no. 1, pp. 18-21.
3. Poliakov M. A., Klimov S. I. Metody i informatsionnye tekhnologii obrabotki dannykh monitornykh parametrov silovogo transformatora [Methods and information technologies for data processing of power transformers monitor parameters] *Elektroenergetichni ta elektromekhanichni sistemi. Visnik natsional'nogo universitetu «L'vivs'ka politekhnika» – Electric power and electromechanical systems. Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, 2009, no. 637, pp. 70-73.
4. Martin D. Improving the determination of water content of power transformer insulation paper near the end of its functional life *Proceedings of the 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Brisbane, QLD, 2016, pp. 1-6. **doi: 10.1109/AUPEC.2016.7749280.**
5. Rassal'skii A. N. Sistemy monitoringa silovykh transformatorov [Power transformers monitoring systems] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no. 3, pp. 40-41.
6. Vasilevskii V. V. Avtomatizatsiia otsenki resursa bumazhnoi izoliatsii silovykh maslonapolnennykh transformatorov na raznykh stadiiakh zhiznennogo tsikla [Automation of resource assessment of oil-immersed power transformers paper insulation at different phases of lifecycle] *Elektromekhanichni ta energozberigaiuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*, 2015, no. 3, pp. 110-116.
7. Andrienko P. D., Sakhno A. A., Konogray S. P., Skrupskaia L. S. Osobennosti nepreryvnogo kontrolia kharakteristik vlagosoderzhaniia izoliatsii maslonapolnennogo elektrooborudovaniia [Online monitoring of the insulation water content characteristics of the oil immersed electrical equipment] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no. 2, pp. 32-40.
8. Andrienko P. D., Konogray S. P. Opredelenie nagruzochnoi sposobnosti silovykh transformatorov s ispol'zovaniem sistem nepreryvnogo kontrolia i stokhasticheskoi optimizatsii [Determination of the load capacity of power transformers using continuous control systems and stochastic optimization] *Elektrotekhnicheskie i komp'iuternye sistemy – Electrotechnical and computer systems*, 2015, no. 19, pp. 119-124.
9. Poliakov M. A. Ot monitoringa parametrov – k monitoringu sostoianii silovogo transformatora [From monitoring parameters to monitoring the states of a power transformer] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no. 1, pp. 49-52.
10. Eva Müllerová, Jan Hrůza, Jiří Velek, Ivo Ullman, František Stříska Life Cycle Management of Power Transformers: Results and Discussion of Case Studies *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 22, No. 4, August 2015, pp. 2379 - 2389.
11. Ballal M. S., Jaiswal G. C., Tutkane D. R., Venikar P. A., Mishra M. K. and Suryawanshi H. M. Online condition monitoring system for substation and service transformers *IET Electric Power Applications*, 2017, vol. 11, no. 7, pp. 1187-1195. **doi: 10.1049/iet-epa.2016.0842.**
12. Polyakov M. A. Teoretiko-mnozhestvennye modeli funktsional'nykh struktur sistem kognitivnogo upravleniia [Set-theoretic models of functional structures of cognitive control systems] *Sistemnye tekhnologii – System technologies*, 2017, no. 3(110), pp. 16-23.
13. Poliakov M. A. Kognitivnye sistemy upravleniia: struktury i modeli [Cognitive management systems: structures and models]] *Elektrotekhnicheskie i komp'iuternye sistemy – Electrotechnical and computer systems*, 2017, no. 25(101), pp. 387-393.
14. Rowley J. The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy *Journal of Information and Communication Science*, 2007, 33 (2), pp. 163-180. **doi: 10.1177 / 0165551506070706.**
15. Poliakov M., Morshchavka S., Lozovenko O. Training in Research on Cognitive Control Systems In proceeding of 20th International Conference on Interactive Collaborative Learnig (ICL2017, 27-29 September 2017, Budapest, Hungary), 2017, pp. 432-441.

Поступила (received) 13.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Когнітивне управління життєвим циклом ізоляції обмоток маслонаповненого силового трансформатора / М. О. Поляков, І. А. Андріяс, С. П. Конограй, В. В. Василевський // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 90-96. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2409-9295.

Когнитивное управление жизненным циклом изоляции обмоток маслонаполненного силового трансформатора / М. А. Поляков, И. А. Андріяс, С. П. Конограй, В. В. Василевский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 90-96. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2409-9295.

Cognitive management of oil-immersed power transformers winding insulations life cycle / M. O. Poliakov, I. A. Andriias, S. P. Konogray, V. V. Vasilevskij // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 90-96. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів /Сведенияобавторах / About the Authors

Поляков Михайло Олексійович **–** ***кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, професор кафедри електричних та електронних апаратів, тел. +38 (093) 074-09-63, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua.***

Поляков Михаил Алексеевич **–** ***кандидат технических наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов, тел. +38 (093) 074-09-63, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua.***

Poliakov Mykhailo Oleksiiovych **–** ***Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Zaporizhzhya National Technical University, Professor at the Department of Electrical and electronic apparatuses, tel. +38 (093) 074-09-63, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua.***

Андріяс Ірина Аркадіївна **–** ***кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок, e-mail: tryf-03@rambler.ru.***

Андрияс Ирина Аркадьевна **–** ***кандидат технических наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, e-mail: tryf-03@rambler.ru.***

Andriias Irina Arkad'evna **–** ***Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Zaporizhzhya National Technical University, Associate Professor at the Department of electric drive and automation of industrial plants, e-mail: tryf-03@rambler.ru.***

Конограй Сергій Петрович **–** ***кандидат технічних наук, ТОВ «Енергоавтоматизація», e-mail: konogray@gmail.com.***

Конограй Сергей Петрович **–** ***кандидат технических наук, ООО "Энергоавтоматизация", e-mail: konogray@gmail.com.***

Konogray Sergei Petrovich **–** ***Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), EnergyAutomation Ltd., e-mail: konogray@gmail.com.***

Василевський Володимир Валентинович **–** ***здобувач кафедри електричних та електронних апаратів, Запорізький національний технічний університет, тел. +38 (050) 889-30-73, e-mail: Lisses@ukr.net.***

Василевский Владимир Валентинович **–** ***соискатель кафедры электрических и электронных аппаратов, Запорожский национальный технический университет, тел. +38 (050) 889-30-73, e-mail: Lisses@ukr.net.***

Vasilevskij Vladimir Valentinovich **–** ***Applicant at the Department of Electrical and electronic apparatuses, Zaporizhzhya National Technical University, tel. +38 (050) 889-30-73, e-mail: Lisses@ukr.net.***

УДК 621.313

О. О. ДУНЄВ, А. В. ЄГОРОВ, А. М. МАСЛЄННІКОВ, В. Д. ЮХИМЧУК

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЕЛИЧИНИ ОБЕРТОВОГО МОМЕНТУ ТРИЗУБЦЕВОГО ДВИГУНА З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ, ВІД АКТИВНОЇ ДОВЖИНИ ЙОГО РОТОРА

Представлена 3D модель високомоментного тихохідного тризубцевого двигуна з ротором, що котиться, з аксіальним магнітним потоком в роторі. Показано результати чисельно-польового розрахунку в програмі ANSYS Maxwell чотирьох конструктивних виконань, які відрізняються довжиною активної частини осердя ротора і матеріалами з яких виготовлені катки на статорі. Отримано розподіл величини магнітної індукції у повітряному проміжку, а також значення обертового моменту для кожного виконання.

Ключові слова: двигун з ротором, що котиться, тривимірна модель, тризубцевий, магнітний потік, чисельно-польовий розрахунок, обертовий момент.

Представлена 3D модель высокомоментного тихоходного трехзубцового двигателя с катящимся ротором с аксиальным магнитным потоком в роторе. Показаны результаты численно-полевого расчета в программе ANSYS Maxwell четырех конструктивных исполнений, отличающихся длиной активной части сердечника ротора и материалами из которых изготовлены катки на статоре. Получено распределение величины магнитной индукции в воздушном зазоре, а также значение вращающего момента для каждого исполнения.

Ключевые слова: двигатель с катящимся ротором, трехмерная модель, трехзубцовый, магнитный поток, численно-полевой расчет, вращающий момент.

Purpose. Getting the dependence of three-tooth motor with a rolling rotor (MRR) torque value from the active length of its rotor by the calculation of magnetic field distribution in four different construction of the MRR. **Methodology**. Modeling of electro-magnetic processes in ANSYS Maxwell 3D solution, which appeared in MRR with different type of construction and properties of its material. **Results.** The results of numerical and field calculation in the ANSYS Maxwell program of four design versions differing via the length of the rotor core active parts and the materials of the stator are presented. The distributions of the magnetic induction in the air gap were obtained, as well as the value of the torque for each MRR design. Also as a result we made the conclusions, that rotor with a half-length of the rotor has a best result of the torque value and less size of its main parts. **Originality.** MRR is a non-standard machine in which the rotor rolls over the stator surface with guaranteed eccentricity. **Practical value.** A 3D model of a high-torque low-speed MRR with an axial magnetic flux are presented, and the results of its modeling calculation and experimental researches are shown for various type of its construction with different size and material properties.

Keywords: motor with a rolling rotor, three-dimensional model, three-tooth, magnetic flux, numerical-field calculation, torque.

Вступ. Відомо, що редукторні електроприводи в більшості випадків мають двох- і багатоланкову конструкцію, в той час, як двигун з ротором, що котиться, (ДРК) має одноланковий механізм передачі обертового моменту, тобто має дуже низькі обороти і відносно великий обертовий момент порівняно з машинами класичного типу. Тому такий двигун може успішно виконувати роль безредукторного, високомоментного електроприводу лебідок, засувок, поворотних пристроїв, антенних систем і інших пристроїв позиціонування [1].

Коефіцієнт редукції ДРК залежить від різниці діаметрів осердь статора і ротора, що дозволяє досягати величин коефіцієнта редукції від 100 до 5000 при незмінній кількості пар полюсів і зубців статора при будь-якому габариті. Таким чином, двигун з ротором, що котиться, є найбільш тихохідною електричною машиною [2].

Двигун з ротором, що котиться, являє собою різновид синхронних тихохідних електричних машин (0,1–30 об/хв), принцип дії якого, ґрунтується на обкатуванні ротором поверхні статора під дією сили одностороннього магнітного тяжіння (СОМТ). Ця сила створюється обмоткою статора і залежить від способу живлення котушок обмотки статора і нерівномірного повітряного проміжку, створеного ексцентричним положенням ротора в розточці статора.

В роботах [3, 4] розглядаються електромагнітні процеси при живленні ДРК від трифазної системи змінної напруги в поєднанні з трифазною обмоткою на статорі. В такій конструкції обертовий момент і швидкість обертання вала залежить від пропорції головних розмірів його активних частин.

Постановка задачі. Метою роботи є визначення найкращих конструктивно-технологічних рішень при створенні нових конструкцій двигунів з ротором, що котиться, з аксіальним магнітним потоком, а саме визначення активної довжини осердя ротора, при незмінній довжині осердя статора. Визначення даного фактору можливо після проведення чисельно-польового розрахунку, з якого можна отримати значення магнітної індукції в повітряному проміжку, ступені насичення осердь статора і ротора, величини обертового моменту, при незмінній геометрії статора і варіюванні в довжині осердя ротора. Це дозволить побудувати діаграму величини максимального обертового моменту й обрати найкраще конструктивне виконання ротора.

Об’єкт дослідження. Моделювання і дослідження проводились на експериментальному зразку високомоментного тихохідного двигуна з аксіальним магнітним потоком в роторі ДРК-50-3, який розроблено і спроектовано в НТУ «ХПІ» співробітниками кафедри «Електричні машини» (рис. 1). Цей двигун має такі геометричні розміри: висота осі обертання h = 90 мм, зовнішній діаметр осердя статора d_{se} = 130 мм, внутрішній діаметр осердя статора d_s = 70 мм, осьова довжина машини l = 55 мм, довжина осердя статора з зубцями l_z = 20 мм, довжина катка l_k = 5 мм, товщина осердя ротора h_r = 5 мм, діаметр осердя ротора d_r = 69,8 мм. Статор має кількість полюсів $2p$ = 1, таким чином, завдяки коефіцієнту редукції, частота обертання ротора складає n = 30 об/хв. Обмотка статора – зосереджена, тобто навколо одного зубця розташована одна котушка.

© О.О. Дунєв, А.В. Єгоров, А.М. Маслєнніков, В.Д. Юхимчук, 2018

Рис. 1 – Експериментальна модель ДРК-50-3

Проектування двигунів краще проводити в спеціалізованих програмних комплексах в яких можна виконувати як звичайні кресленики, так і створювати тривимірні моделі з яких можна зробити кресленики деталей і складаних одиниць. Також потрібна специфікація, яка прив'язується і синхронізується з кресленником. Одним із таких програмних комплексів є програма АСКОН Компас-3D, яка призначена для створення тривимірних асоціативних моделей окремих деталей і складаних одиниць, що містять як оригінальні, так і стандартизовані конструктивні елементи [5, 6]. Позитивною рисою АСКОН Компас-3D є можливість збереження тривимірної моделі з розширенням *.SAT (Standard ACIS Text), що застосовується для обміну 3D-даними між різними програмами САПР.

В цьому програмному середовищі створено тривимірну модель тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі, що показано на рис. 2.

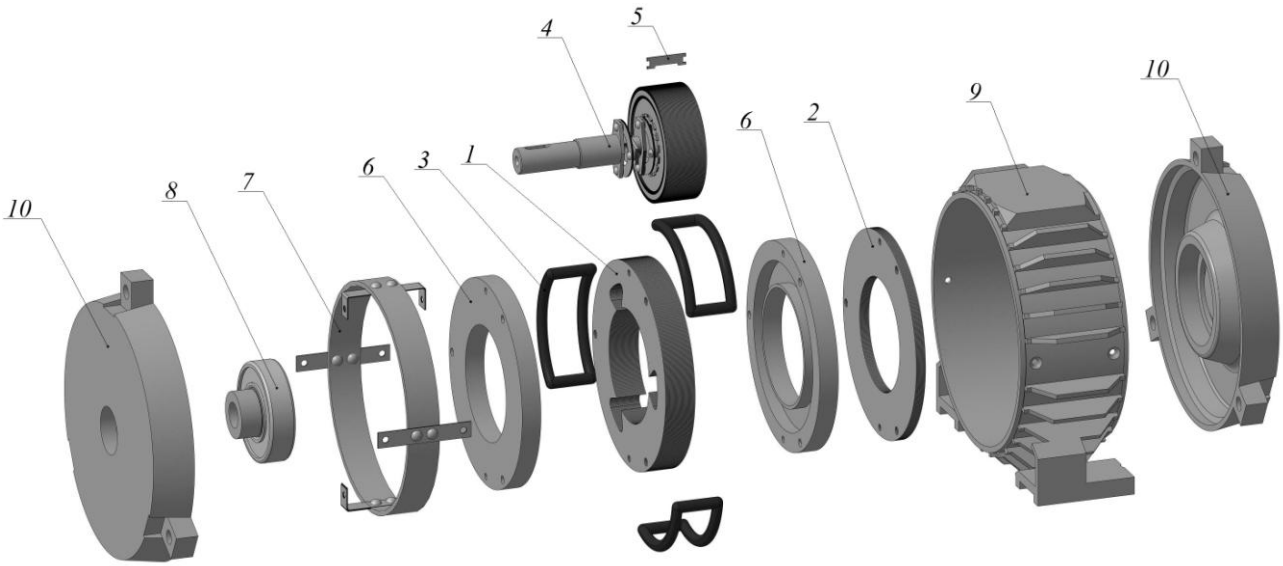


Рис. 2 – Рознесена 3D модель ДРК-50-3:
1 – центральний пакет осердя статора; *2* – боковий пакет осердя статора (каток); *3* – котушка обмотки статора; *4* – ротор; *5* – лист осердя ротора; *6* – захисна манжета; *7* – підвіс осердя статора; *8* – підшипник; *9* – станина; *10* – підшипниковий щит

Особливості тризубцевих ДРК. Розглянемо особливості тризубцевих ДРК, а також проаналізуємо фізику процесів, що є загальною для всіх ДРК з пульсуючим полем, яка найпростіше пояснюється на прикладі найпростішої електромагнітної системи, що показана на рис. 3. Вона складається зі статора з трьома полюсами (зубцями) і циліндричного ротора без обмотки. На полюсах статора, розташованих на 120°, розміщено три котушки обмотки, які підключено до джерела з симетричною трифазною напругою.

У подібній електромагнітної системі тризубцевих ДРК створюються три взаємодіючих пульсуючих магнітних потоки, що замикаються через ротор.

Така модель базується на тризубцевій магнітній системі з тангенціальним або аксіальним магнітним потоком в осерді ротора. Обмотка статора складається з трьох однакових котушок, що можуть з'єднуватися в трикутник або зірку. У кожному з трьох пазів статора розташовано котушки двох фаз.

Реверсування тризубцевих ДРК здійснюється як і у звичайних трифазних електродвигунах – перемиканням двох фаз живлення.

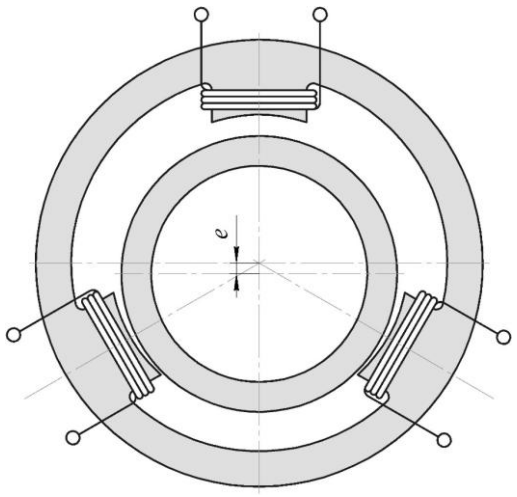


Рис. 3 – Ескіз електромагнітної системи тризубцевого ДРК

Створення оптимальної конструкції ДРК залежить від багатьох факторів, одним з яких є кількість зубців статора. Тому поряд з багатозубцевими ДРК необхідно розглянути конструкції з малим числом зубців. Електромагнітні системи ДРК з малим числом зубців можуть виконуватися з тангенціальним і аксіальним магнітним потоком в роторі [7].

Тризубцеві ДРК з тангенціальним магнітним потоком в роторі. Електромагнітні системи тризубцевих ДРК з тангенціальним магнітним потоком (рис. 4) прості за конструкцією і складаються з осердя з зубцями *1*, на яких розташовані котушки обмотки *2* (має всього три котушки) і ротора *3*.

Однак дана конструкція має істотні недоліки:

– значний зовнішній діаметр двигуна по відношенню до діаметру розточки її поверхні обкатування;

– відносно велику масу сталі осердь;

– відносно великі магнітні втрати, що особливо проявляється в двигунах підвищеної частоти.

Найбільш істотним недоліком двигунів з такими системами є те, що їх ротори працюють в «жорсткому» режимі з усіма притаманними таким режимам недоліками.

На рис. 4 тонкими лініями зі стрілками показаний шлях замикання магнітного потоку, а хрестиками та точками напрям протікання струму.

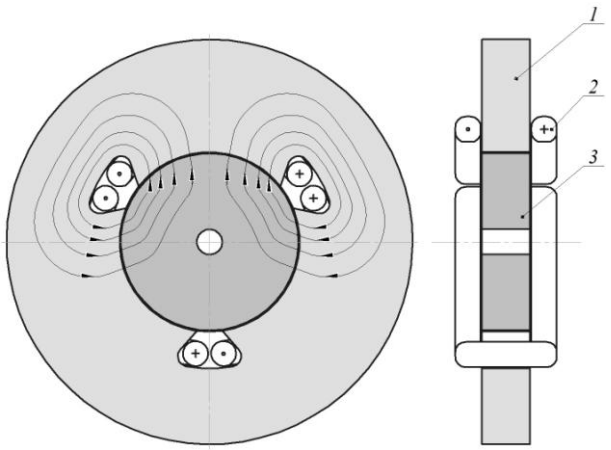


Рис. 4 – Електромагнітна система тризубцевого ДРК з тангенціальним магнітним потоком в роторі:
1 – осердя статора; *2* – котушка; *3* – ротор

Тризубцеві ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі. Одним із шляхів усунення недоліків, властивих тризубцевим ДРК з тангенціальним магнітним потоком в роторі, є створення конструкції, в якій магнітний потік в роторі направляється аксіально.

Статор тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі значно складніший і складається з трьох осердь (рис. 5): середнього *1* з зубцями, на яких розташовані котушки обмотки *2*, і двох кільцевих осердь (катків) *3* без зубців і обмоток, розташованих по обидві сторони осердя *1*. Ротор *4* – шихтований, його пластини розташовані у напрямку магнітного потоку, тобто аксіально.

Незважаючи на те, що в такій системі кількість повітряних проміжків на шляху потоку подвоюється, це не погіршує основних характеристик двигуна, так як всі проміжки є робочими, які беруть участь у створенні СОМТ ротора до статора.

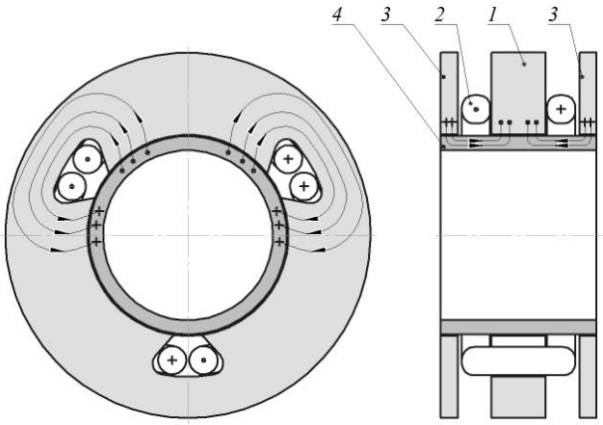


Рис. 5 – Ескіз електромагнітної системи тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі:
1 – осердя статора; 2 – котушка; 3 – каток; 4 – ротор

На рис. 5 тонкими лініями зі стрілками, хрестиками та точками показаний шлях замикання магнітного потоку, аксіальне розщеплення якого дозволяє зменшити товщину ротора, внаслідок чого діаметр двигуна також зменшується.

Основною перевагою тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі є створення гнучкого шихтованого ротора для двигунів практично будь-якого габариту.

Вихідні дані для моделювання. Дослідження та аналіз магнітних систем тризубцевих ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі з метою збільшення обертового моменту при збереженні габаритних розмірів, дозволяє визначити кращі конструктивні виконання, які є найбільш ефективними при перетворенні енергії.

Величина обертового моменту тризубцевого ДКР залежить від розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку B_δ і геометричних розмірів самого двигуна [8]

$$M = \frac{B_\delta^2 \cdot S \cdot d_r}{2 \cdot \mu_0},$$

де S – площа контакту осердь статора і ротора;

μ_0 – магнітна постійна.

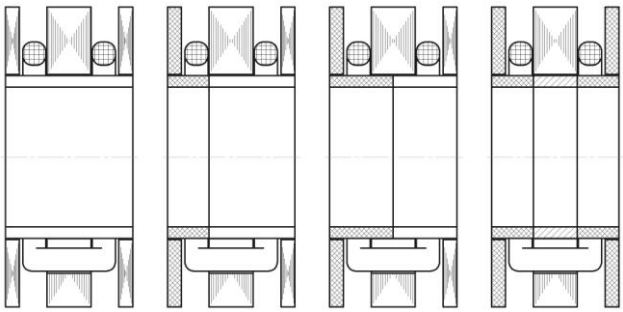
Проаналізувавши конструкції тризубцевих ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі можна виділити чотири конструктивних виконання, які відрізняються довжиною активної частини осердя ротора і матеріалами з яких виготовлені катки на статорі [9]:

I) активна довжина осердя ротора дорівнює довжині всієї машини (рис. 6, *а*);

II) активна довжина осердя ротора дорівнює 2/3 довжини машини (рис. 6, *б*);

III) активна довжина осердя ротора дорівнює половині довжини машини (рис. 6, *в*);

IV) активна довжина осердя ротора дорівнює довжині осердя статора з зубцями (рис. 6, *г*).



а *б* *в* *г*

Рис. 6 – Поздовжній переріз тризубцевого ДРК:
а – конструктивне виконання «I»; *б* – конструктивне виконання «II»; *в* – конструктивне виконання «III»; *г* – конструктивне виконання «IV»

Приймемо дану класифікацію «I», «II», «III», «IV» для подальшого розгляду та аналізу.

Конструктивне виконання «I». Класичне конструктивне виконання тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі складається з осердя статора з зубцями і системи обкатування, яка рознесена одна відносно іншої. Обмотка статора виконана у вигляді котушок, які розташовано в пазах осердя статора з зубцями. Осердя статора з зубцями, система обкатування та осердя ротора виконуються шихтованими з електротехнічної сталі. Різниця між ними полягає в напряму шихтування: пакети статора мають осьовий напрям, а осердя ротора – радіальний, як у колекторів машин постійного струму. Ескіз даної моделі приведено на рис. 6, *а*.

Конструктивне виконання «II». Зменшення активної довжини осердя ротора призводить до не участі одного з катків статора у замиканні магнітного потоку, тому його можна виключити з електромагнітного розрахунку, а сам каток виконати з немагнітного фрикційного матеріалу. Другий каток, як і осердя статора з зубцями, все так само, виконується шихтованим з електротехнічної сталі (рис. 6, *б*). Осердя ротора виконується комбінованим з магнітного і немагнітного матеріалів. Активна довжина осердя ротора при цьому буде дорівнювати сумі довжин осердя статора з зубцями, товщині котушки та довжині одного катка.

Конструктивне виконання «III». Наступний варіант конструктивного виконання двигуна подібний до попереднього, але відрізняється зменшенням активної довжини осердя ротора до половини довжини осердя статора. Один з катків на статорі виконано з немагнітного матеріалу, а інший з електротехнічної сталі. Осердя ротора все також виконується комбінованим з магнітного і немагнітного матеріалів. (рис. 6, *в*).

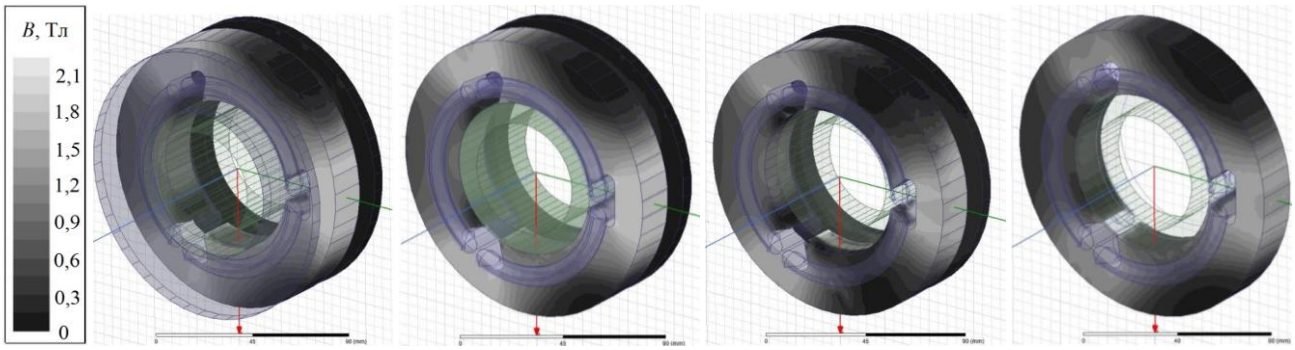
Конструктивне виконання «IV». Останнім виконанням є модель у котрій осердя статора виконано шихтованим з електротехнічної сталі, система обкатування складається з двох катків, які виконано з немагнітного фрикційного матеріалу, а осердя ротора комбіноване: середня його частина з магнітного матеріалу, а бокові – немагнітні (рис. 6, *г*). Таким чином магнітний потік замикається тільки по осердям статора з зубцями і ротора, що являє собою модель тризубцевого ДРК з тангенціальним магнітним потоком в роторі.

Результати моделювання. Для можливості порівняння результатів, що будуть отримані, кожне з конструктивних виконань має однакові геометричні розміри статора і ротора, а відрізняється лише активною довжиною осердя ротора. Розміри котушок та значення їх магніторушійних сил для кожного з варіантів також приймаються однаковими і складає 420 А для кожної котушки.

Для оцінки впливу активної довжини осердя ротора на величину обертового моменту проведено чисельно-польовий розрахунок магнітного поля тризубцевих ДРК на тривимірних моделях для кожного з чотирьох конструктивних виконань, які виконано в програмі АСКОН Компас-3D.

Для моделювання електромагнітних процесів в електричних машинах найбільшу популярність отримала програма ANSYS Maxwell завдяки простоті інтерфейсу і адекватності результатів розрахунку, одержуваних в наслідок моделювання. Особливістю пакету Ansys Maxwell, в порівнянні з аналогічними програмами, є можливість проводити моделювання на тривимірних моделях, що дозволяє врахувати конструктивні особливості кожної машини [10].

Після проведення електромагнітного розрахунку кожного конструктивного виконання з різною активною довжиною осердя ротора в програмі Ansys Maxwell отримано розподіл значень магнітної індукції в кожній точці тривимірної моделі і показано на рис. 7.



а *б* *в* *г*

Рис. 7 – Ступінь насичення осердя статора тризубцевого ДРК:
а – конструктивне виконання «I»; *б* – конструктивне виконання «II»; *в* – конструктивне виконання «III»; *г* – конструктивне виконання «IV»

Програма Ansys Maxwell дозволяє отримати не тільки розподіл значень магнітної індукції в кожній точці тривимірної моделі, але і розрахувати значення обертового моменту. Це є позитивною рисою даної програми, оскільки при аналітичному розрахунку обертового моменту урахування матеріалів, сил одностороннього магнітного тяжіння, інерції ротора є непростою задачею.

В результаті моделювання отримано розподіл величини магнітної індукції у повітряному проміжку (рис. 8), а також значення максимального обертового моменту (рис. 9) для кожного з варіантів конструктивного виконання. Результати моделювання зведено до єдиної системи координат для зручності порівняння.

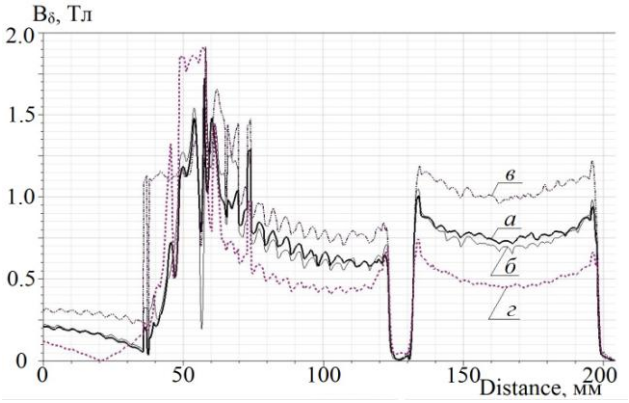


Рис. 8 – Розподіл величини магнітної індукції у повітряному проміжку тризубцевих ДРК: *а* – конструктивне виконання «I»; *б* – конструктивне виконання «II»; *в* – конструктивне виконання «III»; *г* – конструктивне виконання «IV»

Розглядаючи графіки розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку та ступені насичення магнітопроводів ДРК, можна визначити, що обертовий момент двигуна в високій мірі залежить від площі контакту магнітопровідних поверхонь статора та ротора, та від шляху замикання силових ліній магнітного поля.

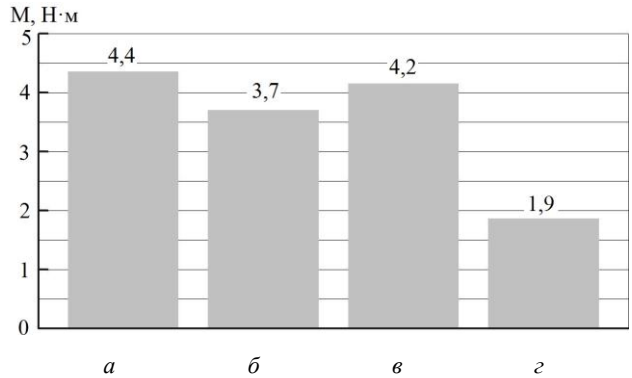


Рис. 9 – Величини обертового моменту тризубцевих ДРК: *а* – конструктивне виконання «I»; *б* – конструктивне виконання «II»; *в* – конструктивне виконання «III»; *г* – конструктивне виконання «IV»

Класичне конструктивне виконання тризубцевого ДРК «I», що має максимальну активну довжину осердя ротора та два магнітопровідних катка з електротехнічної сталі на статорі, має найбільший показник обертового моменту, що складає 4,4 Н·м. Це пов'язано із рівномірним розподілом магнітного поля вздовж шихтованих осердь статора і ротора та їх замиканням без значних втрат через катки із статора до ротора. Це значення приймемо за «одиницю» для можливості порівняння з іншими виконаннями.

Конструкції «II» та «III» виконані із одним магнітопровідним катком, різниця між ними лише у активній довжині осердя ротора. Так у конструкції «II» магнітне поле розподіляється із значним витісненням на поверхню статора і створює обертовий момент, що не перевищує 3,7 Н·м, тобто 0,84 в.о. У конструкції «III», розподіл магнітного поля є більш ефективним та рівномірним, а значення обертового моменту становить 4,2 Н·м (0,95 в.о.), що майже не відрізняється від «класичного» виконання.

У конструктивному виконанні «IV» контактна поверхня найменша і силові лінії магнітного поля замикаються із осердя статора у осердя ротора не вздовж, а поперек осі машини, без допоміжного замикання через катки. Таким чином, сила одностороннього магнітного тяжіння, що обкатує ротор і, як наслідок, обертовий момент – незначні, і складає 1,9 Н·м, тобто 0,43 в.о.

Експериментальне дослідження. Конструкція ДРК-50-3 являє собою конструктивне виконання «III», де активна довжина осердя ротора складає 50% осьової довжини статора. Зняття механічної характеристики відбувалося в лабораторних умовах з підтримкою незмінної трифазної напруги живлення 220 В.

Експеримент почався з режиму неробочого ходу, в ході якого було зафіксовано частоту обертання 30 об/хв, а потім, поступово навантажуючи сам двигун, була знята його механічна характеристика до короткого замикання. Механічна характеристика показана на рис. 10, а крапкою на ній показано результат розрахунку в Ansys Maxwell і, як видно, різниця розрахункового значення максимального обертового моменту на 3% менша за експериментальну.

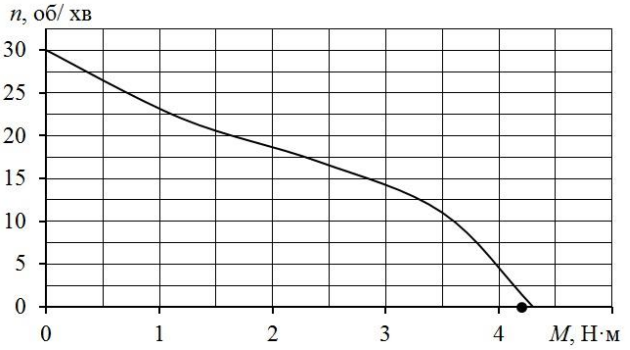


Рис. 10 – Механічна характеристика ДРК-50-3

Слід відзначити, що впродовж всього експерименту постійно фіксувалась температура обмотки статора, і її максимальне значення не перевищило 122 ºС. Значення фазного струму в усіх режимах роботи склало 0,72 А, що ще раз підтвердило, що ДРК не «боїться» роботи в режимі короткого замикання на відміну від усіх інших електричних машин.

Висновки.

1. Конструктивне виконання тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі з активною довжиною осердя ротора, що дорівнює половині довжини машини, вважається найбільш вдалою в плані створення максимального обертового моменту. Різниця в значенні корисного обертового моменту, у порівняння з «класичним» виконанням, складає менше 5%.

2. Дане конструктивне виконання можна робити лише з одним магнітопровідним катком і відмовитися від додаткового немагнітного катка з іншої сторони. Це призведе до покращення масо-габаритних показників, а саме: зменшення осьової довжини машини на 15%, зменшення маси на 10%, економії матеріалів на виготовлення і, як наслідок, до зменшення собівартості машини.

Список літератури

1. Наний В.В. Сравнение мотор-редукторов с высокомоментным двигателем для безредукторного электропривода / В.В. Наний, А.В. Егоров // Электрика – Курск : – 2013. – № 3. – С. 13–17.
2. Бертинов А. И. Электрические машины с катящимся ротором / А. И. Бертинов, В. В. Варлей. – М. : Энергия, 1969. – 200 с.
3. Бертинов А. И. Электромагнитный момент двигателя с катящимся дисковым ротором / А. И. Бертинов // Электричество. – 1971. – № 12. – С. 32–36.
4. Вплив схеми з'єднання котушок обмотки статора двигуна з ротором, що котиться, на його енергетичні показники / А. В. Єгоров [та ін.] // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 106–113.
5. Ганин Н. Б. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D / Н. Б. Ганин. – ДМК-Пресс, 2012. – 784 с.
6. Большаков В. П. Твердотельное моделирование деталей в CAD-системах: AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / В. П. Большаков – Питер, 2014. – 304 с.
7. Борзяк Ю. Г. Электродвигатели с катящимся ротором / Ю. Г. Борзяк, М. А. Зайков, В. П. Наний. – К. : Техніка, 1982. – 120 с.
8. Наний В. В. Влияние формы импульса питающего напряжения на вращающий момент двигателя с катящимся ротором / В. В. Наний, А. М. Масленников, А. В. Егоров, А. А. Дунев // Электрика. – 2014. – № 7. – С. 19–21.
9. Дунєв О.О. Вплив активної довжини осердя ротора на величину обертового моменту в двигуні з ротором, що котиться / О.О. Дунєв, А.В. Єгоров, А.М. Маслєнніков // Тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук» : Секція № 4 Електротехніка, 27-28 грудня 2017 р. – Радом, Польща. – 2017. – С. 60–64.
10. Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 1006 p.

References (transliterated)

1. Naniy V.V., Yehorov A.V. *Sravnenie motor-reduktorov s vyisokomomentnyim dvigatelem dlya bezreduktornogo elektroprivoda* [Comparison of gearmotors with high torque motor for gearless electric drive], Electrics - Kursk: – 2013. – № 3. – p. 13–17.
2. Bertinov A. I. *Elektricheskie mashiny s katjashhimsja rotorom* [Electric machines with a rolling rotor], Moscow : Energia Publ., 1969, 200 p.
3. Bertinov A. I. *Elektromagnitnyj moment dvigatelja s katjashhimsja diskovym rotorom* [Electromagnetic moment of the motor with a rolling disk rotor]. *Jelektrichestvo* [Electricity], 1971, no 12, pp. 32-36.
4. Duniev O. O., Yehorov A. V., Masliennikov A. M. *Vliyanie shemyi soedineniya katushek obmotki statora dvigatelya s rotorom, katitsya, po ego energeticheskie pokazateli* [Influence of the stator coils scheme connection in the motor with a rolling rotor on its energy performance]. Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." - Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. - No. 1 (1223). - P. 106-113.
5. Ganin N. B. *Trehmernoe proektirovanie v KOMPAS-3D* [Three-dimensional design in KOMPAS-3D], DMK-Press Publ., 2012, 784 p.
6. Bolshakov V. P. *Tverdotelnoe modelirovanie detaley v CAD-sistemah: AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo* [Solid modeling of parts in CAD systems: AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo], Piter Publ., 2014, 304 p.
7. Borzyak Y. G. *Jelektrodvigateli s katjashhimsja rotorom* [Electric motors with a rolling rotor], Kyiv, Technics Publ., 1982, 120 p.
8. Naniy V.V., Masliennikov A. M., Yehorov A. V., Duniev O. O. *Vliyanie formyi impulsa pitayuschego napryazheniya na vraschayuschiy moment dvigatelya s katyaschimsya rotorom* [Influence of the supply voltage pulse shape the torque of the motor with a rolling rotor] Electrics. – 2014. – № 7. – p. 19–21.
9. Duniev O. O., Yehorov A. V., Masliennikov A. M. *Vliyanie aktivnoy dlinyi serdechnika rotora na velichinu krutyaschego momenta v dvigatele s rotorom, katitsya* [The effect of the active length of the rotor core the amount of torque in the motor with a rolling rotor]. Abstracts of Intern. scientific and practical. conf. "Modern methods, innovations, and practical application in the field of technical sciences: Section № 4 Electricity, December 27-28, 2017 - Radom, Republic of Poland. – 2017. – p. 60–64.
10. Ansys Inc. Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide, Pittsburgh, 2012, 1006 p.

Надійшла (received) 14.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Залежність величини обертового моменту тризубцевого двигуна з ротором, що котиться, від активної довжини його ротора / О. О. Дунєв, А. В. Єгоров, А. М. Маслєнніков, В. Д. Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 97–103. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Зависимость величины вращающего момента трехзубцового двигателя с катящимся ротором, от активной длины его ротора / А. А. Дунев, А. В. Егоров, А. М. Масленников, В. Д. Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 97–103. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

The dependence of three tooth motor with a rolling rotor torque value from the active length of its rotor / O. O. Duniev, A. V. Yehorov, A. M. Masliennikov, V. D. Yuhimchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 97–103. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дунєв Олексій Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: duniev.khpi@gmail.com

Дунев Алексей Александрович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: duniev.khpi@gmail.com.

Duniev Oleksii Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: duniev.khpi@gmail.com.

Єгоров Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: yehorov.andrii@gmail.com.

Егоров Андрей Владимирович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: yehorov.andrii@gmail.com.

Yehorov Andrii Volodimirovych – Candidate of Technical Sciences, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: yehorov.andrii@gmail.com.

Маслєнніков Андрій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: x-maslennikov@yandex.ua.

Масленников Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: x-maslennikov@yandex.ua.

Masliennikov Andrii Mikhailovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: x-maslennikov@yandex.ua.

Юхимчук Володимир Данилович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: uhimchuk.vladimir@gmail.com.

Юхимчук Владимир Данилович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: uhimchuk.vladimir@gmail.com.

Yuhimchuk Vladimir Danilovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: uhimchuk.vladimir@gmail.com.

УДК 621.313

В. И. МИЛЫХ, Л. В. ШИЛКОВА

ЧИСЕЛЬНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ІНДУКТОРА МАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Подано принципи і результати чисельно-польового дослідження магнітного поля (МП) індуктора магнітного сепаратора на базі трифазного асинхронного двигуна серії А51/2 в режимі неробочого хода. МП аналізується у тривимірному розподілі чисельним методом плоско-ортогональних моделей. Результати чисельних розрахунків підтвердженні результатами вимірів магнітної індукції (МІ) у ході описаного експерименту. За результатами дослідження для експериментального зразка виявлена робоча зона обертового МП з підвищеним рівнем МІ для найбільш ефективного перемішування суміші речовин.

Ключові слова: магнітний сепаратор, індуктор, магнітне поле, чисельні розрахунки, магнітна індукція, плоско-ортогональні моделі, експериментальне дослідження, тесламетр, робоча зона.

Представлены принципы и результаты численно-полевого исследования магнитного поля (МП) индуктора магнитного сепаратора на базе трехфазного асинхронного двигателя серии А51/2 в режиме холостого хода. МП анализируется в трехмерном распределении численным методом плоско-ортогональных моделей. Результаты численных расчетов подтверждены результатами измерений магнитной индукции (МИ) в ходе описанного эксперимента. По результатам исследования для экспериментального образца выявлена рабочая зона вращающегося МП с повышенным уровнем МИ для наиболее эффективного перемешивания смеси веществ.

Ключевые слова: магнитный сепаратор, индуктор, магнитное поле, численные расчеты, магнитная индукция, плоско-ортогональные модели, экспериментальное исследование, тесламетр, рабочая зона.

The principles and results of the numerical and experimental study of the magnetic field of the magnetic separator inductor based on the three-phase asynchronous motor series A51/2 in no-load condition. A quasi-three-dimensional mathematical model describing the magnetic field of the inductor is formed, and a method for calculating this field in its volume is set out. To calculate the method of flat-parallel calculation models is used, that is, spent numerically-field interconnected calculations of the magnetic field in the transverse and longitudinal sections of the inductor. The interrelation of these fields is carried out with the help of a set of special boundary conditions in these sections. The comparison and confirmation of the calculated magnetic field with the measured magnetic field during the experiment is carried out. With the magnetic separator inductor, its magnetic field will be created by an alternating current, that is, when working with alternating voltage. For correct comparison with the calculated magnetic field, measurements were made when powered from a DC network. This is due to the fact that the magnetic field simulation in the FEMM program is carried out at instantaneous current values, that is, simulates the instant of time in which the current has constant values. For surges and recessions in magnitude magnetic induction distributions in a transverse section, a working chamber of an inductor sample is defined. Due to the gradient in the distribution of magnetic induction in the longitudinal section, the inductor's working zone will contribute to the "retraction" of the ferromagnetic working elements.

Keywords: magnetic separator, inductor, magnetic field, numerical calculations, magnetic induction, plane-orthogonal models, experimental study, teslameter, working area.

Вступ. Широкі можливості в галузі технологій розділення дрібних об’єктів з різними електромагнітними властивостями та перемішування різних сумішей з точки зору суттєвого підвищення інтенсивності і продуктивності технологічних процесів відкриваються з використанням магнітних сепараторів (МС) на базі трифазного асинхронного двигуна (ТАД).

Взагалі існує багато варіантів конструкцій МС, і серед них є МС, в яких перемішування здійснюється обертовим магнітним полем (МП), що збуджується індуктором, створеним на базі статора ТАД. Під дією такого поля дрібні феромагнітні елементи рухаються в робочій зоні і створюють так званий «вихровий шар» у деякій робочій масі, яка зазнає необхідну технологічну обробку [1–3].

Для поширення МС, які виконують функцію перемішування, у різні технологічні процеси актуальною стає оцінка розподілу обертового МП та виявлення робочої зони ефективного використання з підвищеним рівнем МІ усередині індуктора реального зразка індуктора МС.

Простір усередині індуктора є немагнітним, тому розподіл МП становиться тривимірним.

Якісно аналіз цього МП можливо провести чисельними методами та важливим є порівняння його з виміряним розподілом МП. Така задача потребує нетривіальних підходів, бо безпосередній розрахунок та вимірювання тривимірного МП є дуже складними.

Тому аналіз цього МП належить до низки наукоємних системних задач електромеханічної галузі, розв’язання якої дозволить оптимізувати параметри при створенні відповідних методик проектування МС такого типу.

Постановка задачі. Завданням даної роботи є чисельний аналіз МП методом плоско-ортогональних моделей і з уточненням одержуваних даних по вимірювальним приладам, який дозволить виявити робочу зону ефективного використання з підвищеним рівнем МІ усередині індуктора експериментального зразка індуктора МС на базі ТАД. На даному етапі дослідження індуктора МС здійснювався аналіз МП в режимі неробочого ходу, тобто без впливу феромагнітних елементів в робочій зоні, що буде наступною – значно більш складною задачею.

Об’єкт дослідження. Об’єктом дослідження є електромагнітна система індуктора МС на базі ТАД серії А51/2 загальний вигляд якого подано на рис. 1.

Індуктор МС (рис. 2) має розміри:
– зовнішній діаметр осердя d_{se} = 0,245 м;
– внутрішній діаметр осердя d_s = 0,14 м;
– активна довжина l_a = 0,09 м.

Основні параметри індуктора МС:
– номінальна напруга U_N = 220 В;
– номінальний струм I_N = 24 А;
– кількість полюсів $2p$ = 2;
– кількість пазів індуктора Q_s = 24;

© В. И. Милых, Л.В. Шилкова, 2018

– кількість пазів індуктора на полюс і фазу $q_s = 4$;

– активний опір фазної обмотки індуктора $R_{s0a} = 0{,}575$ Ом.

Обмотка індуктора двошарова, розподілена з діаметральним кроком, схема з'єднання – «зірка».

Рис. 1 – Загальний вигляд ТАД серії А51/2

Рис. 2 – Індуктор МС

Розрахункова модель індуктора. Розрахунки МП проводились за допомогою програми FEMM [4] методом плоско-ортогональних моделей [5–7], тобто чисельно-польовими взаємопов'язаними розрахунками МП в поперечному та повздовжньому перерізах індуктора, взаємозв'язок яких здійснюється за допомогою комплексу спеціальних граничних умов у цих перерізах.

Для цього створена розрахункова модель електромагнітної системи індуктора в його поперечному та повздовжньому перерізах, яка подана на рис.3.

Чисельний розрахунок МП індуктора МС у поперечному перерізі. Принципи розрахунку МП в поперечному перерізі індуктора МС у цілому відповідають аналогічним розрахункам ТАД [8] навіть зі спрощенням через відсутність ротора. На рис. 3 позначена і далі використовується циліндрична система координат r, α, z з початком в геометричному центрі індуктора 0.

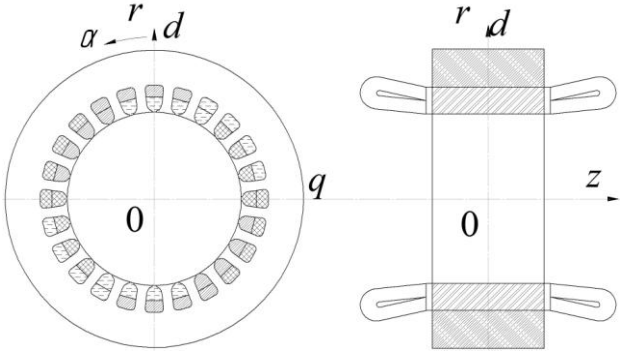


Рис. 3 – Конструктивна схема індуктора МС

МП в поперечному перерізі описується відомим двовимірним диференційним рівнянням

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\nu_e r\frac{\partial A_z}{\partial r}\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \alpha}\left[\nu_e\frac{\partial A_z}{\partial \alpha}\right]=-J_z, \quad (1)$$

де A_z, J_z – аксіальні складові векторного магнітного потенціалу (ВМП) та густини струму; ν_e – питомий магнітний опір (ПМО).

Для ділянок області розрахунку в шихтованому осерді використовується еквівалентне ПМО

$$\nu_e = \nu_f / k_{fe}, \quad (2)$$

де ν_f – ПМО сталевих листів; k_{fe} – коефіцієнт заповнення ними осердя.

Для решти області ν_e відповідає магнітної властивості немагнітних середовищ.

Розповсюдження МП обмежувалось зовнішньою поверхнею осердя індуктора, де була задана гранична умова Діріхле:

$$A_z=0. \quad (3)$$

В фазних зонах трифазної обмотки статора задана симетрична система фазних струмів:

$$\begin{aligned} I_{sA} &= I_{ms}\cos(\omega_s t);\\ I_{sB} &= I_{ms}\cos(\omega_s t-2\pi/3);\\ I_{sB} &= I_{ms}\cos(\omega_s t+2\pi/3), \end{aligned} \quad (4)$$

де t – час; I_{ms} – амплітуда; ω_s – кутова частота.

Амплітудне значення струму індуктора $I_{ms} = \sqrt{2}\cdot I_N = \sqrt{2}\cdot 24 = 33{,}94$ А.

В момент часу струм в фазній обмотці A дорівнює амплітудному значенню $i_{sA} = I_{ms}$=33,94А, в B и C – $i_{sB} = i_{sC} = -0{,}5I_{ms} = 16{,}97$А.

В пазах статора на рис.4 показані відповідні напрямки фазних струмів, знаки + та – після їх символів повинні бути ще додані до їх миттєвих значень.

Рівняння (1) з урахуванням струмів (4) та умови (3) розв'язувалось методом скінчених елементів за програмою FEMM. При цьому враховувалися нелінійні магнітні властивості матеріалу осердя – електротехнічної сталі марки 2013.

Отримана картина силових ліній МП поперечному перерізі індуктора. Це лінії рівного ВМП, які проведені з визначеним кроком від максимального його значення A_{max}=0,007 Вб/м. Картина МП подана на рис. 4.

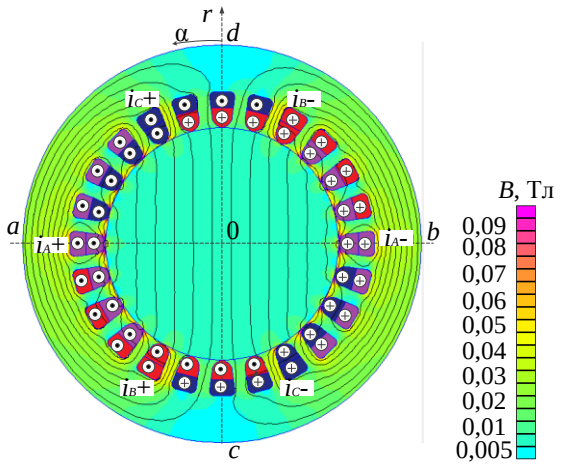


Рис. 4 – МП розрахункової моделі індуктора МС у поперечному перерізі

За розподілом ВМП $A_z(r,\alpha)$ через вираз $\vec{B} = \mathrm{rot}\vec{A}$ визначаються координатні складові МІ:

$$B_r = \frac{1}{r}\frac{\partial A_z}{\partial \alpha}; \quad B_\alpha = -\frac{\partial A_z}{\partial r}. \qquad (5)$$

Важливим аспектом підготовчої роботи до розрахунку МП індуктора МС у повздовжньому перерізу є визначення падіння магнітної напруги на відрізку 0*d* по радіусу до r_d (рис. 4):

$$U_{mag} = \int_0^{r_d} H_r dr, \qquad (6)$$

де H_r – радіальна складова напруженості магнітного поля, яка визначається за формулами:

$$H_r = \nu_e H_r = \nu_e \frac{1}{r}\frac{\partial A_z}{\partial \alpha}. \qquad (7)$$

Для розрахункової моделі на рис. 4 в програмі FEMM визначено U_{mag} = 3528,49 А.

Чисельний розрахунок МП індуктора МС у повздовжньому перерізі. МП у поперечному перерізі (рис. 4) є симетричним відносно зображених осей, тому його, в принципі, можна розглядати у чверті перерізу 0*db*.

Так само, електромагнітна система індуктора симетрична і у повздовжньому перерізі відносно зображених осей 0*r* та 0*z* (рис. 3).

Таким чином на рис. 3 сформована поздовжньо-поперечна розрахункова модель електромагнітної системи індуктора, де лінія 0*d* є спільною для обох перерізів. Тому на цієї лінії для цих перерізів повинні бути однаковими розподіли МІ та падіння магнітної напруги. Або, у крайню міру, близькими у межах допустимої погрішності.

В зубцево-пазовім шарі осердя індуктора в поперечному перерізі структура являється дискретною (зубець-паз), а у повздовжньому перерізі – суцільною, що зображено на рис. 5. Для врахування цього для повздовжнього перерізу введено еквівалентній коефіцієнт заповнення сталлю:

$$k_{fets} = \frac{b_k \cdot k_{fe}}{\tau_{sr}}, \qquad (8)$$

де $\tau_{sr} = \frac{2\pi \cdot r_k}{Q_s}$ – зубцево-пазовий крок на радіусі r_k; $b_k = \tau_{sr} - b_n$ – ширина зубця на тому ж радіусі.

В програму FEMM магнітні властивості задаються у числовій формі, у тому числі k_{fets}. Тому зубцево-пазова структура на рис. 6 у повздовжньому перерізі подана шарами, для кожного з яких коефіцієнт k_{fets} по (8) визначався на його середньому радіусі r_k. Таким чином визначено низку значень k_{fets} від 0,505 до 0,613 (знизу вгору).

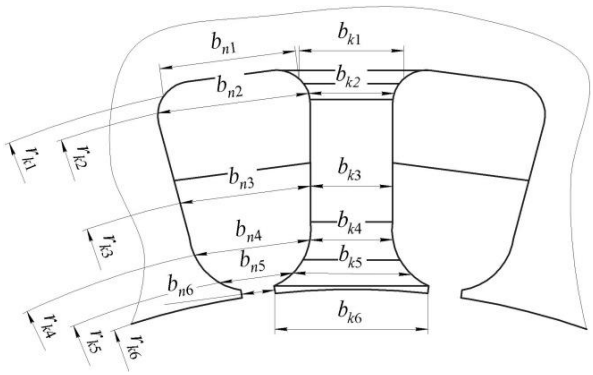


Рис. 5 – Фрагмент зубцево-пазової структури індуктора

Зазначимо, що після розрахунку МП у програмі FEMM, МІ безпосередньо в сталевих листах зубців треба визначати за формулою:

$$B_{fet} = \frac{B_{ek}}{k_{fets}}, \qquad (9)$$

де B_{ek} – МІ, яка визначена у еквівалентному суцільному середовищі, отриманому через застосування k_{fets}, причому формула чинна як для складових МІ, так і для її модуля.

Виконана підготовка суцільного (тобто однорідного) по координаті α повздовжнього перерізу індуктора в координатній площині *rz* (рис. 6) дозволяє перейти до формування математичної моделі МП в цьому перерізі. При цьому важливо те, що у поперечному перерізі в робочій зоні індуктора біля осі 0*d* силові лінії МП практично паралельні одна одній. І оскільки саме тут проходить повздовжній переріз, то в його площині можна МП вважати плоско-паралельним.

У такому разі тут можна для МП застосувати відповідне двовимірне диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left[\nu_{rz}\frac{\partial A_\alpha}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\nu_{rz}\frac{\partial A_\alpha}{\partial z}\right] = -J_\alpha, \qquad (10)$$

де A_α, J_α – складові ВМП та густини струму, які є ортогональними площині (r, z); ν_{rz} – розподіл ПМО у повздовжньому перерізі.

У повздовжньому перерізі струм є у лобовій частині обмотки статора. На обрану чверть загальної області розрахунку тут приходиться та ж сама МРС обмотки статора, як і на чверть поперечного перерізу індуктора, а саме, з урахуванням заданих струмів (4) для часу t = 0:

$$F_s = N_s I_{ms}, \quad (11)$$

яка становила 543 А.

Для розрахункової моделі сформовані граничні умови.

З урахуванням симетрії струмів відносно лінії *z* та *dg* на рис. 6 для ВМП встановлюється умова Неймана:

$$\left(\frac{\partial A_\alpha}{\partial r}\right)_{0b} = 0 \text{ та } \left(\frac{\partial A_\alpha}{\partial r}\right)_{dg} = 0 \quad (12)$$

при якій силові лінії МП поля є перпендикулярними 0*b* та *dg*.

З урахуванням асиметрії струмів відносно лінії *r* на рис. 6 лінії 0*d* для ВМП встановлюється умова Діріхле:

$$(A_\alpha)_{0d} = 0, \quad (13)$$

при якій силова лінія магнітного поля співпадає з 0*d*.

У той же час, на лінії *gecb* задана умова Діріхле:

$$(A_\alpha)_{dgecb} = C_{var}, \quad (14)$$

де C_{var} – деяка константа, яка визначена у процесі розрахунку МП – рішення рівняння (10).

Для визначення початкового значення C_{var} на ділянці від 0 до *l* на лінії 0*b* задавалось значення МІ B_{r0}, знайдене у поперечному перерізі індуктора (рис. 4). Магнітний потік на цієї ділянці було визначено двома виразами:

$$\Phi_{\alpha 0l} = (A_{\alpha 0} - A_{\alpha b})l_\alpha \text{ та } \Phi_{\alpha 0l} = B_{r0} l_z l_\alpha \quad ,(15)$$

де l_z – довжина ділянки від 0 до точки *l*.

Враховуючи, що $A_{\alpha 0} = 0$ і $A_{\alpha b} = C_{var}$, та прирівнюючи два вирази (15), після перетворень отримуємо для (14) константу:

$$C_{var} = B_{r0} l_z. \quad (16)$$

Далі, з задаванням умов (12), (13), (14) та МРС лобової частини обмотки (11), методом скінчених елементів по програмі FEMM розв'язується рівняння (10) з урахуванням нелінійних магнітних властивос–тей сталі осердя індуктора. Результат порівнюється зі значенням падіння магнітної напруги U_{mag}, яке знайдене раніше у поперечному перерізі індуктора за (6). Серією розрахунків МП за програмою FEMM і відповідних коригувань було знайдене значення $C_{var} = 0{,}16$. При цьому біло визначено максимальне значення ВМП $A_{\alpha max}$=0,0085 Вб/м. Отримана картина силових ліній МП повздовжньому перерізі індуктора подана на рис.6.

Експериментальне дослідження МП індуктора МС. При описанні схеми експерименту слід зауважити, що при роботі індуктора МС його МП буде створюватися змінним струмом, тобто працювати при живленні змінною напругою.

Але для коректного порівняння з розрахованим МП чисельним методом вимірювання проведено при живленні від мережі постійного струму. Це пов'язано з тим, що моделювання МП у програмі FEMM проводиться при миттєвих значеннях струму, тобто імітує момент часу у котрому струм має незмінні (постійні) значення.

Дослідження проводилось по схемі, поданій на рис. 7.

Живлення обмотки індуктора проводилось від мережі за напругою U = 110 В, що фіксувалось на вольтметрі V.

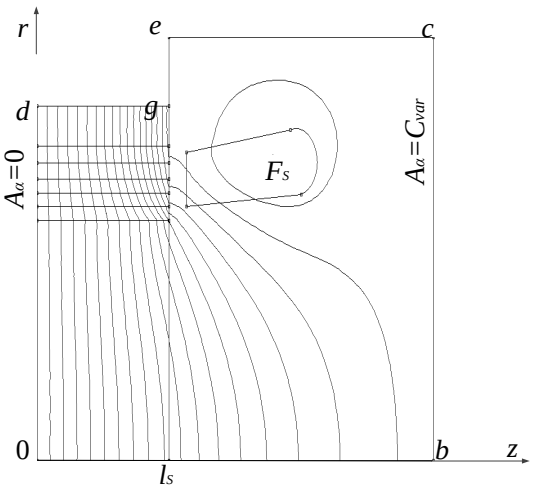
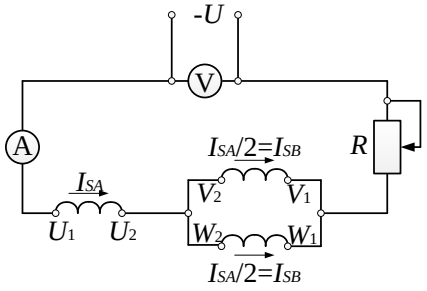


Рис. 6 – Картина силових ліній МП розрахункової моделі індуктора у повздовжньому перерізі



U_1–U_2, V_1–V_2, W_1–W_2 – початки та кінці затискачів трифазної обмотки індуктора

Рис. 7 – Електрична схема проведення досліду

Для порівняння результатів вимірювання МП з розрахованим МП чисельним методом за допомогою регулювання опору *R* досягалось значення амплітудного струму у фазі *A* I_{SA} = 34 А, що фіксувалось на амперметрі А, тоді згідно зі схемою проведення досліду в двох інших фазах *B* та *C* досягались значення струмів рівних половині від'ємного значення номінального струму у фазі *A* $I_{SB} = -I_{SC}$ = 17 А.

Значення опору *R* для досягнення номінального струму у фазі становило

$$R = \frac{U}{I_{sA}} - 1{,}5R_{sA}, \quad (17)$$

де R_{sA} – активний опір фазної обмотки індуктора.

Тобто, підставляючи значення до (17), отримали *R* = 2,4 Ом.

Вимірювання МІ, створеної постійним струмом, слід проводити тесламетром з датчиком Холла.

Фотографія проведення вимірювання МІ тесламетром наведена на рис. 8.

Вимірювання МІ проводились у повздовжньому перерізі індуктора та по повздовжній 0*d* та поперечній 0*q* осях поперечного перерізу індуктора в точках з шагом у 10 мм.

Рис. 8 – Вимірювання МП індуктора

Порівняння чисельних і експериментальних розрахунків МП індуктора МС. Розподіли радіальної складової магнітної індукції на радіальних лініях $0b$ та $0d$ визначеними чисельним методом показано суцільними лініями (r – радіус), а точками показана виміряні значення в процесі експерименту на рис. 9.

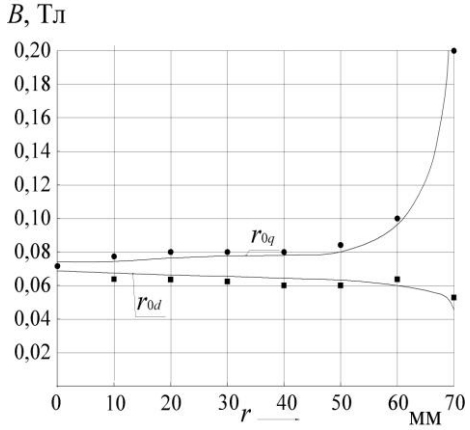


Рис. 9 – Розподіл МІ на повздовжній r_{0d} і поперечній r_{0q} осях у поперечному перерізі індуктора МС

У межах робочої зони індуктора МС МІ досягає значення 0,07 Тл і розподілена доволі рівномірно, що є одним із основних критеріїв ефективної роботи МС. Графіки розподілу МІ підтвердили однорідність МП в перпендикулярній площині до осі індуктора, що є однією із найважливіших вимог, які пред'являються до МС обертового МП. Сплески та спади у розподілах величини МІ у поперечному перерізі знаходяться поблизу фазних зон та їх стиків відповідно. Тобто саме у цій зоні сплесків та спадів МП буде ефективно обертати феромагнітні елементи. Це дозволяє зробити висновок, що згідно з розподілом МП робоча камера для даного зразка індуктора має мати внутрішній та зовнішній радіуси 60 мм та 70 мм відповідно.

Але поряд з цим постає завдання дослідження розподілу МП по аксіальній його осі, що завжди є актуальним у відносно великих немагнітних просторах, оточених феромагнітними екранами.

На рис. 10 кривою лінією поданий суцільною лінією розподіл радіальної складової МІ вздовж лінії $0b$ визначеними чисельним методом, а точками показана виміряні значення в процесі експерименту. Наочно, що у точці 0, яка є центром робочої зони індуктора (рис. 10), виявилося, що B_r = 0,07Тл, як і планувалося. Тобто у робочій зоні індуктора на лінії $0d$ розподіл B_r виявився таким самим, як і у поперечному перерізі на цієї ж лінії. Однієї з особливостей розподілу $B_r(z)$ є те, що на межі активної частини індуктора (точка l на рис. 6) крива має помітний градієнт $\frac{\partial B}{\partial z}$, що буде сприяти «втягненню» феромагнітних робочих елементів в робочу зону індуктора МС.

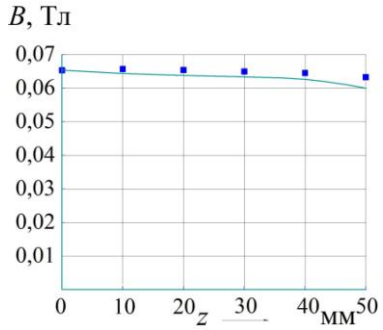


Рис. 10 – Розподіл радіальної складової МІ по осі z

Порівняння чисельних і експериментальних розрахунків МП індуктора МС підтверджують достатню точність проведених досліджень.

Висновки.

1. У результаті огляду областей застосування та огляду сучасних досліджень аналогів МС підтверджена актуальність проведеного дослідження.
2. Комплексний чисельно-польовий аналіз МП індуктора МС дозволяє проаналізувати розподіли МІ у його поперечному і поздовжньому перерізах та проявити сплески та спади у розподілі у поперечному перерізі для ефективного перемішування суміші речовин та значну зміну на межі активної довжини робочої зони МС у повздовжньому перерізі у достатній мірі для «втягнення» феромагнітних робочих елементів в робочу зону.
3. Експериментальний аналіз МП підтвердив отримання розподілів МІ.
4. Завдяки проведеному чисельно-експериментальному дослідженню визначена робоча зона індуктора досліджуваного зразка.

Список літератури

1. *Логвиненко Д.Д.* Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д.Д. Логвиненко, О.П. Шеляков // Киев: техника, 1976. – 144 с.
2. *Загирняк М.В.* Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: Монография / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз, И.А. Шведчикова; Под ред. М.В. Загирняка. – К.: Техніка, 2011. – 224 с.
3. Компания GlobeCore / Аппарат Вихревого Слоя АВС-100. – Режим доступу : https://avs.globecore.ru/products/avs-100.html. – Дата звертання : 30 вересня 2017.

4. *Meeker D.* Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. – Режим доступа: http://www.femm.info/wiki/OldVersions.
5. *Милых В. И.* Численный анализ магнитного поля цилиндрического трехфазного индуктора магнитного сепаратора / В. И. Милых, Л. В. Шилкова, С. А. Ревуженко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1123). – С. 76-83.
6. *Милых В. И.* Расчет электромагнитного поля в продольном сечении электрической машины / В. И. Милых // Электротехника. – 1984. – № 12. – С. 41–46.
7. *Милых В. И.* Сравнительный анализ вариантов граничных условий при численном расчете магнитного поля в концевой зоне турбогенератора методом плоско-ортогональных расчетных моделей / В. И. Милых, О. Н. Дубинина // Технічна електродинаміка. Темат. вип. Проблеми сучасної електротехніки. – 2002. – Ч. 5. – С. 10–15.
8. *Милых В. И.* Численно-полевой поверочный анализ проектных параметров трехфазных асинхронных двигателей / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2016. – Вип. 1 (33). – С. 58–65.

References (transliterated)

1. Logvinenko D.D., Sheljakov O.P. *Intensifikacija tehnologicheskih processov v apparatah s vihrevym sloem* [Intensification of technological processes in apparatus with a vortex layer]. Kiev, Tehnika Publ, 1976. 144 p
2. Zahyrnyak M.V., Branspiz Ju.A., Shvedchikova I.A. *Magnitnye separatory. Problemy proektirovanija*. [Magnetic separators. Design issues]. Kiev, Tehnika Publ, 2011, 224 p.
3. Kompanija GlobeCore. *Apparat Vihrevogo Sloja AVS-100*. [Company GlobeCore. Vortex Layer Machine ABC-100]. Available at: https://avs.globecore.ru/products/avs-100.html. (accessed 30.09.2017).
4. Meeker, D. "Finite Element Method Magnetics: OldVersions." *Finite Element Method Magnetics: HomePage*. DavidMeeker, 11 October 2010. Web. 10 March 2014 <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>
5. Milykh V. I., Shilkova L. V. Revuzhenko S. A. Chislennyj analiz magnitnogo polja cilindricheskogo trehfaznogo induktora magnitnogo separatora [Numerical analysis of the magnetic field of a cylindrical three-phase magnetic separator inductor]. *Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems. Release* 1/2017 (1123), pp. 76-83.
6. Milykh V. I. Raschet elektromagnitnogo polya v prodolnom sechenii elektricheskoy mashiny [Calculation of the electromagnetic field in the longitudinal section of an electrical machine]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering]. Moscow, 1984, no. 12, pp. 41-46.
7. Milykh, V. I., and O. N. Dubinina. "Sravnitelnyiy analiz variantov granichnyih usloviy pri chislennom raschete magnitnogo polya v kontsevoy zone turbogeneratora metodom plosko-ortogonalnyih raschetnyih modeley." *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyy vypusk. Problemy suchasnoyi elektrotekhniky*. Vol. 5. Kyiv: IED NANU, 2002. 10–15. Print.
8. Milykh V. I., Shilkova L. V. Chislenno-polevoy poverochnyiy analiz proektnyih parametrov trehfaznyih asinhronnyih dvigateley [Numerically-field confirmatory analysis of a three-phase induction motor design parameter]. *Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems. Release* 1/2016 (33), pp. 58-65.

Надійшла (received) 14.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельно-експериментальний аналіз магнітного поля індуктора магнітного сепаратора на базі асинхронного двигуна / В. І. Мілих, Л. В. Шилкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 104-109. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Численно-экспериментальный анализ магнитного поля индуктора магнитного сепаратора на базе асинхронного двигателя / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 104-109. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Numerical-experimental analysis of the magnetic field of a magnetic separator inductor on the basis of an asynchronous motor / V. I. Milykh, L. V. Shilkova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 104-109. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мілих Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Милых Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Milykh Vladimir Ivanovych, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Chair of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Шилкова Лариса Василівна, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних машин, тел. (057)707-68-44, e-mail: larisa_lv@ukr.net.

Шилкова Лариса Васильевна, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры электрических машин, тел. (057)707-68-44, e-mail: larisa_lv@ukr.net.

Shilkova Larisa Vasilivna, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Senior Lecturer of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44, e-mail: larisa_lv@ukr.net.

УДК 621.313.322

K. A. KUCHYNSKYI, V. O. TITKO, M. S. HUTOROVA, V. A. MYSTETSKYI

MECHANICAL PROCESSES IN THE TERMINAL PARTS OF THE TURBOGENERATOR STATOR IMBRICATED CORE IN THE PRESENCE OF THE TOOTH AREA PRESSING DEFECTS

Вдосконалено математичну модель та методику розрахунку механічних характеристик в натискних плитах, обумовлених коливанням розпресування зубцевої зони. Реалізація моделі дозволила виявити особливості коливних процесів в механічно з'єднаній системі «зубець-палець-плита» при дефектах пресування осердя статора турбогенератора в зубцевій зоні, зокрема, при різній ступені розвитку дефектів, а саме – відгині різної кількості натискних пальців та зміні геометрії зубця при його частковому розкришенні. Виявлено появу вібрацій певних частот, яких не спостерігалось в умовно бездефектному генераторі, що дає можливість розробки в подальшому способу діагностування стану зубцевих зон магнітопроводу.

Ключові слова: турбогенератор, кінцева зона, зубець, призма, натискний палець, шихтований магнітопровід, механічні характеристики.

Усовершенствована математическая модель и методика расчета механических характеристик в нажимных плитах при распрессовке зубцовой зоны. Реализация модели позволила выявить особенности вибрационных процессов в механически связанной системе «зубец-палец-плита» при дефектах прессовки сердечника статора турбогенератора в зубцовой зоне, в частности, при различной степени развития дефектов, а именно – отгибе различного количества нажимных пальцев, а также изменении геометрии зубца при его частичном раскрашивании. Выявлено появление вибраций определенных частот, которых не наблюдалось в условно бездефектном генераторе, что дает в дальнейшем возможность разработки способа диагностики состояния зубцовых зон магнитопровода.

Ключевые слова: турбогенератор, концевая зона, зубец, призма, нажимной палец, шихтованный магнитопровод, механические характеристики.

A mathematical model and method of calculating the mechanical characteristics of the pressure in the slabs due to fluctuations in the tooth area pressing out was developed. The model implementation allowed identifying the characteristics of oscillatory processes in the mechanically connected "tooth-finger-plate" system in the presence of the turbogenerator stator core pressing defects in the tooth area, particularly with various defect degrees, namely bending of the different number of tooth supports and change in the tooth geometry upon its partial breakage. The vibrations in the fingers and plates at the site of contact were calculated, subject to occurrence of defects in pressing of the core tooth area (bending of the different number of fingers and change in the tooth geometry), as well as numerical values of the tooth vibration frequencies at the beginning of their sudden destruction. It was revealed that depending on the depth of the broken part, the tooth oscillation frequency changes, causing a decrease in the frequency of its transverse vibrations and a sharp increase in the oscillation amplitude, resulting in a growth of strain and stress. These processes greatly intensify the degree of tooth destruction. The emergence of certain vibration frequencies were revealed, which were observed in a relatively defect-free generator, which enables the further development of a method of diagnosing the state of the magnetic duct tooth areas.

Keywords: turbogenerator, terminal zone, tooth, prism, pressure finger, imbricated core, mechanical characteristics.

Introduction. It is known that almost all thermal power plant generating equipment is morally and physically obsolete, since it has worked for more than 200 thousand hours. Reliability of this equipment is reduced. The most problematic unit is the generator stator imbricated core, which has a complicated system of mounting and, in the course of operation, by virtue of thermomechanical forces, the system changes its mechanical condition, weakening or, contrarily, increasing the stator core force of pressing the iron sheets.

The analysis of information on failures and damages to the turbogenerators (TG) units shows that the main causes of damage to the TG stator 160−320 MW is damage to the active steel and windings due to local overheating, active steel pressing weakening, loosening of the grooving wedge and frontal winding part fasteners, as well as their increased vibration [1]. This is also the case for the nuclear power plant TGs 1000 MW.

As the nuclear power plant share in the total amount of the electricity generated in the country is increased, and a small rated capacity of the pumped storage power plants, the thermal power plant TGs will work in maneuvering, dynamic modes, in which the reliability of the generating equipment is much lower. The frequency of injuries in these modes, according to various estimates, increases 2−7 times. There is a need to develop the means to improve, primarily, the mechanical stability of the generator structural elements to these regimes. This is especially true for the tooth area of the imbricated core, pressed by separate tooth supports. As the load changes, and uneven heating is reduced and increased, they withstand the thermostatic varying forces, under the influence of which they may bend. This results in the local pressing out, mechanical destruction under the influence of electromagnetic forces, leading to severe emergency shutdowns of generators and, consequently, to under-production of electricity.

The pressure plates and tooth supports are the key elements directly supporting the pressing effort at the end of the core. As the pressing of the TG stator core is weakened, primarily the tooth area, a mechanical movement of the stator imbricated core and cracking of the TG stator active iron sheets occurs, provided that the generator runs for some time with the pressed out core. To avoid this, a continuous diagnostics is required [2].

This is a challenge for the experts in all companies globally, producing the powerful TGs, in particular «Electrovazhmash» plant (Kharkiv). However, the use of all methods and measures to increase the mechanical stability, in particular baking of the outer packages of the imbricated core, did not result in the ultimate addressing of this problem. The monitoring and diagnosing of the magnet core technical condition is not implemented, especially in the tooth area, since one side can have about a hundred of tooth supports, and it is unreasonable to install pressure sensors in each of them. Thus, the state of the problem is such that it needs further development and solution.

The objective of this research is to determine the distribution and redistribution of the mechanical forces,

©K.A. Kuchynskyi, V.O. Titko, M.S. Hutorova, V.A. Mystetskyi, 2018

torque, linear elongations and deformations in the presence of defects of the tooth area pressing during operation on the basis of the developed mathematical model to calculate the mechanical properties in the terminal part of the TG stator core for further development of improved methods and means of control and diagnostics.

The mathematical model and method of calculating the mechanical properties in the terminal part of the TG stator core in the presence of the tooth area pressing defects during operation was improved. The general equation of static equilibrium is considered, which takes into account the influence of the pressure fingers on the tooth of the TG stator core in view of the tooth defect, in addition to the impact of the tooth supports and shrinking prisms on the stator core.

A mechanical system consisting of a plate, tooth supports, shrinking prisms and teeth was considered. This takes into account the impact of the tooth area defects on the stator core imbricated iron. The model takes into account the change in mechanical properties and parameters in the tooth supports, shrinking prisms, and tooth area over time, provided that the resultant of all forces and all moments is zero [3]. After conversion of static equations into dynamic, a system of two linear ordinary differential equations of the second order with two unknowns is solved. This system is solved using the analytical method by characteristic equations.

Fig. 1 schematically depicts the structure of the pressure plate, tooth support and tooth, and shows the mechanical strength in the tooth area of the stator core (R – means the radius of the circle drawn by the axis of shrinking prisms [m]; r–means the radius of the circle passing through the middle of the contact area of the tooth supports [m]; b –means the distance between the middle of the tooth support contact zone and the shrinking prism [m]; b_f– means a full length of the tooth support [m]).

Let us use a general equation of static equilibrium to describe the mechanical processes, which considers only the effect of the tooth supports and shrinking force of the shrinking prisms on the stator core of a powerful TG TGV-300 [4, 5].

$$\sum_{i=1}^{n}\vec{m}_i+\sum_{I=1}^{N}\vec{M}_I=0;\quad \sum_{i=1}^{n}\vec{f}_i+\sum_{I=1}^{N}\vec{F}_I=0, \quad (1)$$

where $\vec{m}_i=\vec{r}_i\times\vec{f}_i$ means the moment of force $\vec{f}_i$ of the i-th finger affecting the pressure plate; $\vec{M}_I=\vec{R}_I\times\vec{F}_I$ means the moment of force of the I-th shrinking prism affecting the pressure plate; N means the number of shrinking prisms in the TG stator; n means the number of the tooth supports in TG stator; $\vec{f}_i$ means the force affecting the i-th tooth support of a synchronous generator stator; $\vec{F}_I$ means the force affecting the I-th shrinking prism of the generator stator (Fig. 1) [3].

Then let's apply a general equation of static equilibrium to describe the mechanical processes, which considers, besides the impact of the tooth supports and shrinking prisms on the stator core, the impact of the tooth supports and teeth of the stator core TGV-300 in view of the tooth defects:

$$\vec{m}_n^*+\sum_{i=1}^{n}\vec{m}_i+\sum_{I=1}^{N}\vec{M}_I=0;\quad \vec{f}_n^*+\sum_{i=1}^{n}\vec{f}_i+\sum_{I=1}^{N}\vec{F}_I=0, \quad (2)$$

where f^*_n, m^*_n – means the force and the moment of force affecting the part of the tooth after the latter is broken.

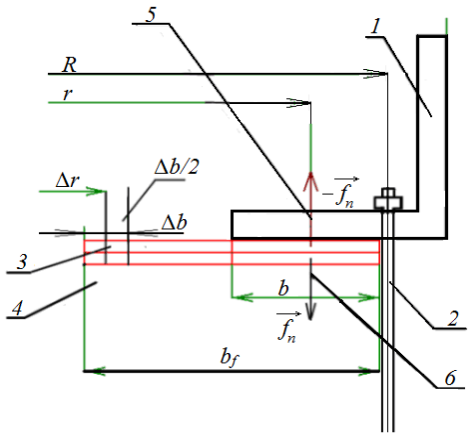


Fig. 1 – Graphic presentation of a mathematical model:
1 – plate, *2* – prism, *3* – finger, *4* – tooth, *5* – force affecting the finger, *6* – force affecting the tooth

Having assumed that the distribution of the mechanical stress of the tooth support on the tooth acts uniformly, then $f^*_n=f_n-\Delta f$, $m^*_n=m_n-\Delta m$.

$$\begin{aligned} &r(f_1\cos(\varphi_1)+\ldots+f_1\cos(\varphi_n))-R(F_1\cos(\Phi_1)+\ldots+\\ &F_N\cos(\Phi_N))-\Delta r\Delta f=0,\\ &F_1+F_2+F_3+\ldots+F_N=f_1+f_2+f_3+\ldots+f_n-\Delta f,\\ &f_1+f_2+\ldots+f_n-\Delta f=P-\Delta f, \end{aligned} \quad (3)$$

where F_1, F_2, F_3, … F_N – means the value of mechanical forces in shrinking prisms; f_1, f_2, f_3 , …– f_N means the value of mechanical forces in the tooth supports [N]; φ_i –is the angle of the i-th finger position in the TG stator; Φ_I – means the angle of location of the I-th shrinking prism in the TG stator; P – means the total load of the TG stator pressed iron [N]; Δf – means a change in the force from mechanical action of the tooth on the tooth support after breakage of a single tooth [N]; Δm – means change of the moment of force from mechanical action of the tooth on the tooth support after breakage of a single tooth [N·m]; Δr – means the shoulder of the moment of force from the mechanical action of the tooth on the tooth support after breakage of a single tooth [m].

From a static system of equations (3) after some transformations let is proceed to a dynamic system of equations:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{n}m_i-\sum_{I=1}^{N}M_i=r(f_1\cos(\varphi_1)+\ldots+f_n\cos(\varphi_n))-\\ &-R(F_1\cos(\Phi_1)+\ldots+F_N\cos(\Phi_N))=M_y=\varepsilon_y J_y,\\ &f_1+f_2+\ldots+f_n-\Delta f=P-\Delta f,\\ &M_y=\varepsilon_y J_y=J_y(a_n-a_{n/2})/2r=J_y 2\ddot{c}/2r=-J_y 2\ddot{c}, \end{aligned} \quad (4)$$

where J_y – means a moment of inertia of the pressing plate; ε_y – means an angular acceleration upon vibration oscillations of the pressure plate around the center of mass; a_n – means the vibration acceleration of the pressure plate at the point above the n-finger; $a_{n/2}$ – means the vibration acceleration of the pressure plate at the point above the $n/2$-finger; c – means the proportionality factor, which takes into account the uneven distribution of mechanical stress and strength in the fingers of TG stator.

The total value of projections of the force moments in the tooth supports, teeth and shrinking prisms affecting the pressure plate is respect of y axis create an angular acceleration ε_y. The total value of the force in the tooth supports for our mathematical model is always constant and equal to $P–\Delta f$.

The total value of the effect of the force moment projections from the tooth supports and teeth in relation to y axis is:

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{n} m_i = r((f_0 + ckr\cos(\varphi_1))\cos(\varphi_1) + ... + \\ &(f_0 + ckr\cos(\varphi_n))\cos(\varphi_n)) - \Delta f \Delta r\cos(\varphi_n) = \\ &= 0{,}5ckr^2 n - \Delta f \Delta r,\end{aligned} \quad (5)$$

where k – means the average coefficient of elasticity of TG stator tooth support [N/m].

From a system of equations (4), after some transformations and considering the equations (5), we obtain a system of equations:

$$\begin{aligned}&0{,}5ckr^2 n - r\Delta f - 0{,}5R^2 KCN = -J_y \ddot{c}, \\ &nf_0 = P,\end{aligned} \quad (6)$$

where K – means the average coefficient of elasticity of TG stator shrinking prism [N/m]; C – means the coefficient of proportionality, taking into account the uneven distribution of mechanical loads and forces in shrinking prisms of the TG stator.

For further calculations, let us conventionally split the shrinking prism into two halves along the y axis.

$$J_y \ddot{c} + 0{,}5ckr^2 n - \Delta f \Delta r - R^2 KcN = 0, \quad (7)$$

$$\ddot{c} + 0{,}5ckr^2 n / J_y - R^2 KcN / J_y - \Delta f \Delta r / J_y = 0. \quad (8)$$

Given a mechanical defect in the form of a partial tooth breakage, we get:

$$\begin{aligned}&\Delta f = (\Delta S / S)(f_0 + ckr\cos(\varphi_n)) = \\ &= (\Delta S / S)(f_0 + ckr) = (\Delta S / S)(P / n + ckr),\end{aligned} \quad (9)$$

where S – means the area of the tooth contact with the tooth support; ΔS – means the area of the broken tooth part.

After some transformations, we obtain the following expression:

$$\ddot{c} + c\omega^2 - (\Delta S / S)\Delta rP / (nJ_y) = 0, \quad (10)$$

where the value of the square of the angular velocity is:

$$\omega^2 = (0{,}5kr^2 n - R^2 KN - kr(\Delta S / S)\Delta r) / J_y. \quad (11)$$

The general solution of equation (10) will look as follows:

$$\begin{aligned}&c(t) = A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t) + \\ &+ ((\Delta S / S)\Delta rP / (nJ_y)) / \omega.\end{aligned} \quad (12)$$

To find the A value we consider that at the initial time $t=t_0$ before tooth breakage and occurrence of additional vibrations, all tooth supports are all the same conditions, having the same load and the same initial compression. It follows that $c(0)=0$ and

$$A = -((\Delta S / S)\Delta rP / (nJ_y \omega)). \quad (13)$$

Similarly, to find B, given that all tooth supports are in the same conditions, i.e. have the same compression and no extraneous vibration shift of one finger relative to the other, $\dot{c}(0) = 0$ and B=0. Then the solution of equation (10) will look as follows:

$$\begin{aligned}&c(t) = ((\Delta S / S)\Delta rP / (nJ_y \omega)) - \\ &- \cos(\omega t)((\Delta S / S)\Delta rP / (nJ_y \omega)).\end{aligned} \quad (14)$$

The results of calculating the vibration and mechanical characteristics in the terminal part of the TG stator core, in the presence of the tooth area pressing defects. The calculation was carried out for TGV-300 type TG. The numerical value of the total load on all shrinking prisms or on all fingers is P=8829000 N.

The numerical value of mechanical force component f_0, acting on each tooth support, is $f_0 = P/n$ = 8829000/60 = 147150 N.

The numerical value of the mechanical compression of the tooth support Δl_0 in the area of contact of the tooth support and the pressing plate is $\Delta l_0 = f_0/k$ = 147150/(44100000000) = 3,33673 mkm.

The numerical value of the mechanical stress σ_0 for the tooth support in the contact area of the tooth support and the pressing plate is $\sigma_0 = f_0/s$ = 14014285,71 Pa.

The numerical value of the distribution of q_0 mechanical force for the tooth support in the contact area of the tooth support and pressing plate is q_0 = 392,4 kN/m.

The obtained numerical values of the parameters coincide with the defect-free operation mode. The contact area of the tooth and the tooth support is S = 0,027325 m^2.

From the size of the tooth area geometry, the area of the broken part of TG stator core tooth is found using the trapezoid area formula $\Delta S = (0{,}02 – 0{,}005)\Delta b + \text{tg}\alpha\Delta b^2 = (0{,}02 – 0{,}005)\Delta b + 0{,}053571\Delta b^2$, where Δb – means the depth of the tooth broken part (Fig. 2).

The tangent of the angle α equals tgα = 0,053571429.

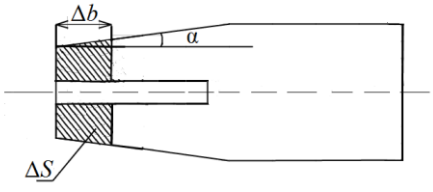


Fig. 2 – General layout of the broken tooth part

The tooth breaking process is seen in the terminal area of the TG stator core.

The numerical values of the tooth oscillation frequency at the beginning of their sudden collapse (at $\Delta b = 0$) and the ratio of this frequency to the 50 Hz electric current is as follows:

$$\omega_0^2 = (0{,}5kr^2n - R^2KN)/J_y = 10395225\ \text{s}^{-2},$$

$$\omega_0 = \sqrt{(0{,}5kr^2n - R^2KN)/J_y} = 3224{,}628\ \text{s}^{-1},$$

$$\nu_0 = 5131{,}41\ \text{Hz}, \quad \nu_0/50 = 102{,}63.$$

Calculations show that depending on the depth of the broken part, ν_i tooth oscillation frequency changes. There is a decrease in the frequency of its transverse vibrations. This generates a sharp increase in amplitude and, consequently, the growth of strains and stresses, sharply intensifying the tooth destruction process [6].

We will calculate the mechanical characteristics with regard to the tooth defects (the breakage depth is $\Delta b = 0{,}025$ m).

From solution of equations (12), (13) we obtain

$$c(t) = 8{,}84\cdot10^{-10} - 8{,}84\cdot10^{-10}\cos(3223{,}82t).$$

Then the dependence on the time of mechanical force for the *i*-th tooth support upon destruction of the *n*-th wave ($i = n$) ($\Delta b = 0{,}025$ m)

$$f_i(t) = P/n + (A\cos(\omega t) - A)kr\cos(\varphi_i) =$$
$$= P/n - Akr\cos(\varphi_i) + Akr\cos(\varphi_i)\cos(\omega t).$$

Hence

$$f_i = 147{,}15 + 0{,}0439\cos(\varphi_i) - 0{,}0439\cos(\varphi_i)\cos(\omega t)\ \text{кN}.$$

It is evident that the forces affecting the finger have a constant component, fluctuating over time, and a component depending on the coordinates (φ_i – determines the angular distance of the *i*-th finger or tooth to the broken one).

The mean value of the $\sigma_i(t)$ mechanical stress dependence on time for the *i*-th tooth support, taking into account the tooth defect ($\Delta b = 0{,}025$ m) is as follows:

$$\sigma_i = 14014{,}286 + 4{,}184\cos(\varphi_i) - 4{,}184\cos(\varphi_i)\cos(\omega t) =$$
$$= 13808{,}8 - 4{,}121\cos(\omega t)\ \text{кPa}.$$

The mean value of the $\Delta l_i(t)$ mechanical shift dependence on time for the *i*-th tooth support, taking into account the tooth defect ($\Delta b = 0{,}025$ m) is as follows

$$\Delta l_i(t) = P/(kn) - Ar\cos(\varphi_i) + Ar\cos(\varphi_i)\cos(\omega t) =$$
$$= 3{,}33673\cdot10^{-6} + 9{,}96168\cdot10^{-10}\cos(\varphi_i) -$$
$$- 9{,}96168\cdot10^{-10}\cos(\varphi_i)\cos(\omega t)\ \text{m}.$$

Let us find the dependence of the $q_i(t)$ mean mechanical power distribution (mechanical force vs length ratio) from the time when the tooth is broken ($\Delta b = 0{,}025$ m):

$$q_i(t) = 392{,}4 + 0{,}117\cos(\varphi_i) - 0{,}117\cos(\varphi_i)\cos(\omega t)\ \text{N/m}.$$

The results of the estimated studies are shown in fig. 3 and tabl. 1.

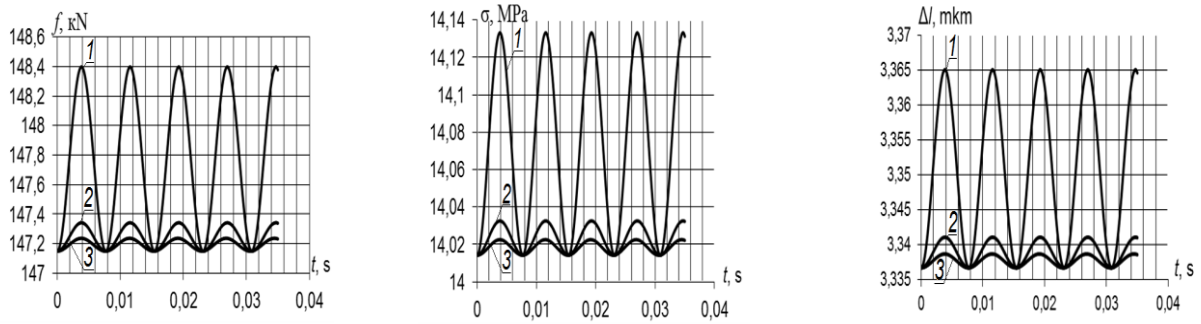


Fig. 3 – Dependence of the mechanical force, stress and shift from time affecting the 1-st and 59-th tooth support at the initial moment of tooth destruction under the 60-th finger (for 3 breakage options):
1 – at $\Delta b = 0{,}2$ m, *2* – at $\Delta b = 0{,}05$ m, *3* – at $\Delta b = 0{,}025$ m

Tabl. 1 shows the mechanical properties in the contact area of the fingers and plate stator of the TG 300 MW for varying degrees of the tooth breakage and, for comparison, when the tooth area pressing zone is normal and when one to five fingers are bent, and upon normal pressing of the stator core in the tooth area. The mechanical characteristics are presented in the table for the set mode.

Calculations of mechanical properties in the mechanically connected "tooth-finger-plate" system upon analysis of the dynamic process show that to monitor the same, it is sufficient to install only one sensor anywhere in a circle within the contact area of the plate and tooth supports. It is thus possible to monitor the changes in these characteristics, regardless of the sensor site. However, there are difficulties associated with the need to install the highly sensitive sensors, as well as change in mechanical forces and stresses are negligible (tabl. 1).

The research based on monitoring the mechanical characteristics in the contact area of the plate and finger as the defects of the tooth area pressing develop also showed the emergence of certain vibration frequencies not observed in a "relatively defect-free" generator. Based on this phenomenon, we might further develop an effective way to monitor and diagnose the pressing out of the tooth area of a powerful TG stator.

Table 1 – Mechanical characteristics in the area of contact of the tooth supports and plate with varying degrees of tooth defects (Δb=0,025 m; 0,05 m; 0,2 m*)* and the normal compression of the stator core in the tooth area (a relatively defect-free state) and when one to five fingers are bent, and upon normal pressing of the stator core in the tooth area

№ finger	«Defect-free»			Δb=0,025 m			Δb=0,05 m			Δb=0,2 m		
	σ_i, MPa	f_i, kN	Δl_i, mkm	σ_i, MPa	f_i, kN	Δl_i, mkm	σ_i, MPa	f_i, kN	Δl_i, mkm	σ_i, MPa	f_i, kN	Δl_i, mkm
1	14,0143	147,15	3,337	14,0184	147,193	3,3377	14,0235	147,246	3,3389	14,0737	147,774	3,3509
2	14,0143	147,15	3,337	14,0184	147,193	3,3377	14,0233	147,244	3,3389	14,0727	147,763	3,3507
3	14,0143	147,15	3,337	14,0183	147,191	3,3377	14,0231	147,242	3,3388	14,0711	147,746	3,3503
…	….	….	….	….	….	….	….	….	….	….	….	….
58	14,0143	147,15	3,337	14,0184	147,193	3,3377	14,0233	147,244	3,3389	14,0727	147,763	3,3507
59	14,0143	147,15	3,337	14,0184	147,193	3,3377	14,0235	147,246	3,3389	14,0737	147,774	3,3509
60	14,0143	147,15	3,337	13,8088	144,993	3,2878	13,5696	142,480	3,2309	11,4160	119,868	2,7181
№ finger	1 finger is bent			3 fingers are bent			5 fingers are bent					
	σ_i, MPa	f_i, kN	Δl_i, mkm	σ_i, MPa	f_i, kN	Δl_i, mkm	σ_i, MPa	f_i, kN	Δl_i, mkm			
1	14,74	154,80	3,510	0	0	0	0	0	0			
2	14,73	154,72	3,508	15,36	161,83	3,76	0	0	0			
3	14,72	154,58	3,5052	15,32	161,36	3,75	16,22	167,30	3,83			
4	14,70	154,38	3,5007	15,26	160,71	3,71	16,10	166,08	3,8			
….	….	….	….	….	….	….	….	….	….			
57	14,72	154,58	3,5051	15,32	161,36	3,75	16,22	167,30	3,83			
58	14,73	154,72	3,5083	15,36	161,83	3,76	0	0	0			
59	14,74	154,80	3,5102	0	0	0	0	0	0			
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

Conclusions.

1. A mathematical model and method of calculating the mechanical characteristics of the pressure plates due to fluctuations of the tooth area pressing out was improved. The model takes into account both the impact of the tooth supports and shrinking prisms, and the impact of the tooth supports and shrinking prisms of the TG stator core, considering the tooth defects, and allows calculating the mechanical properties at the beginning of the oscillation process and during static equilibrium, without inclusion of relaxation processes.

2. These characteristics were studied in a mechanically connected "tooth-finger-plate" system, provided the appearance of pressing defects in the core tooth area, particularly when a different number of tooth supports is bent, and the tooth geometry is changed. It was determined that changes in mechanical forces and stresses when 1 to 7 fingers are bent made up no more than 10 %, while a single finger was broken, these changes were even smaller, about 1 %. Therefore, to monitor the pressing status, it is required to use highly sensitive measuring equipment. Thus, the work was carried out in two ways, by controlling the mechanical characteristics on the pressure plates and vibrations caused by development of defects regarding the change of the tooth geometry and the number of bent tooth supports, the frequency of which varies depending on the relevant pressing state.

References

1. *Голоднова О. С.* Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов / *О. С. Голоднова, Г. В. Ростик* // В сб. «Электросила». – 2004. – № 43. – С. 55-64.
2. *Кузнецов Д. В.* Развитие методов исследования процессов в узлах крепления сердечников статоров к корпусам турбогенераторов и совершенствование их диагностики в условиях эксплуатации: автореф. дис. на получение научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы» / Д. В. Кузнецов. –М., 2009. – 25 с.
3. *Титко О. І.* Математичне моделювання вібраційних процесів у системі кріплення осердя статора турбогенератора при раптовому обриві стяжних призм / *О. І .Титко, В. А. Крамарський, В .А. Мистецький* // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2016. – № 44. – С. 43-50.
4. *Кучинський К. А.* Механічні та вібромеханічні характеристики натискних пальців і плит осердя статора турбогенератора / *К. А. Кучинський, В. О. Тітко, М. С. Гуторова, В. А. Мистецький* // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2017. – № 48. – С. 82-87.
5. *Kuchynskyi K., Titko V., Hutorova M., Mystetskyi V., Khudyakov A., Prus V.* Mathematical model and research results of vibromechanical processes in the elements of the powerful synchronous generator end area / *K. Kuchynskyi, V. Titko, M. Hutorova, V. Mystetskyi, A. Khudyakov, V. Prus* // Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, IEEE-MEES'17, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine (November 15–17, 2017). – Kr. : Kr.NU, 2017. Pp. 308-311.
6. *Васьковский Ю. Н.* Моделирование процесса усталостного разрушения зубцов крайних пакетов сердечника статора мощных турбогенераторов / *Ю. Н. Васьковский, Ю. А. Шумилов, А. В. Штогрин* // Вісник НТУ «ХПІ». – 2009. – № 9. – С. 22-28.

References (transliterated)

1. Golodnova O. S., Rostik G. V. Analiz i meropriyatiya po preduprezhdeniyu povrezhdeniy serdechnikov statorov turbogeneratorov [Analysis and actions for prevention of damages of cores stators turbogenerators]. *«Elektrosila» Sbornik* [Collection «Elektrosila»]. St. Petersburg, 2004, no 43, pp. 56-64.
2. Kuznetsov D. V. *Razvitie metodov issledovaniya protsessov v uzlah krepleniya serdechnikov statorov k korpusam turbogeneratorov i sovershenstvovanie ih diagnostiki v usloviyah ekspluatatsii: avtoref. dys. nazdobuttyanauk. stupenyakand. tekhn. nauk: spets. 05.14.02 «Elektrostantsii i elektroenergeticheskie sistemyi»* [Development methods of a research processes in knots fastening of cores stators to cases turbogenerators and improvement their diagnostics under operating conditions. Abstract of a thesis candidate eng. sci. diss. (Ph. D.) 05.14.02 "Power plants and electrical power systems"]. Moscow, 2009. 25 p.
3. Tytko O. I., Kramars'kyy V. A., Mystets'kyy V. A. Matematychne modelyuvannya vibratsiynykh protsesiv u systemi kriplennya oser-

dya statora turboheneratora pry raptovomu obryvi styazhnykh pryzm [Mathematical modeling vibration processes in the system fastening of a stator core turbogenerator at a sudden break of the bonded prisms]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrayiny:* Zb. nauk. pr [Works of the institute of electrodynamics of the national academy of sciences of Ukraine]. Kiev, 2016, no. 44, pp. 43-50.

4. Kuchyns'kyy K. A., Titko V. O., Hutorova M. S., Mystets'kyy V. A. *Mekhanichni ta vibromekhanichni kharakterystyky natysknykh pal'tsiv i plyt oserdya statora turboheneratora* [Mechanical and vibromechanical characteristics of the pressure fingers and plates of the stator core of the turbogenerator]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrayiny:* Zb. nauk. pr [Works of the institute of electrodynamics of the national academy of sciences of Ukraine]. Kiev, The Institute of Electrodynamics Publ., 2017, no. 48, pp. 82-87.
5. Kuchynskyi K., Titko V., Hutorova M., Mystetskyi V., Khudyakov A., Prus V. Mathematical model and research results of vibromechanical processes in the elements of the powerful synchronous generator end area. *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, IEEE-MEES'17 (15-17 november 2017, Kremenchuk)* [Information technology: science, engineering, technology, education. – Pract. Conf. (15-17 november 2017, Kremenchuk)]. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine Publ., 2017, pp. 308-311.
6. Vaskovskiy Yu. N., Shumilov Yu. A., Shtogrin A. V. Modelirovanie protsessa ustalostnogo razrusheniya zubtsov kraynih paketov serdechnika statora moschnyih turbogeneratorov [Modeling the process fatigue failure the teeth extreme packages of the stator core powerful turbo-generators]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2009, no. 9, pp. 22-28.

Received 14.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Механічні процеси в кінцевих частинах шихтованого магнітопроводу статора турбогенератора при дефектах пресування зубцевої зони / К .А. Кучинський, В. О. Тітко, М. С. Гуторова, В. А. Мистецький // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 110–115. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Механические процессы в концевых частях шихтованного магнитопровода статора турбогенератора при дефектах прессовки зубцовой зоны / К. А. Кучинский, В. О. Титко, М. С. Гуторова, В. А. Мистецкий // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 110–115. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Mechanical processes in the terminal parts of the turbogenerator stator imbricated core in the presence of the tooth area pressing defects / K. A. Kuchynskyi, V. O. Titko, M. S. Hutorova, V. A. Mystetskyi // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 110–115. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кучинський Костянтин Артурович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електродинаміки НАН України, провідний науковий співробітник, (044)366-26-88; e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com

Кучинский Константин Артурович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт электродинамики НАН Украины, ведущий научный сотрудник, (044)366-26-88; e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com

Kuchynskyi Kostiantyn Arturovich, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Officer, Institute of electrodynamics of NAS Ukraine, Leading Researcher; +38(044) 366-26-88; e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com

Тітко Владислав Олексійович, кандидат технічних наук, Інститут електродинаміки НАН України, старший науковий співробітник; (044)366-24-79; e-mail: votitko@ied.org.ua

Титко Владислав Алексеевич, кандидат технических наук, Институт электродинамики НАН Украины, старший научный сотрудник; (044)366-24-79; e-mail: votitko@ied.org.ua

Titko Vladislav Olekseevich, Candidate of Technical Sciences, Institute of electrodynamics of NAS Ukraine, Senior Research Officer; +38(044) 366-24-79; e-mail: votitko@ied.org.ua

Гуторова Марина Сергіївна, кандидат технічних наук, Інститут електродинаміки НАН України, науковий співробітник; (044)366-24-68; e-mail: ma_gu@ukr.net

Гуторова Марина Сергеевна, кандидат технических наук, Институт электродинамики НАН Украины, научный сотрудник; (044)366-24-68; e-mail: ma_gu@ukr.net

Hutorova Maryna Serhiyivna, Candidate of Technical Sciences, Institute of electrodynamics of NAS Ukraine, Research Officer; +38(044) 366-24-68; e-mail: ma_gu@ukr.net

Мистецький Віктор Анатолійович, інженер 1 категорії, Інститут електродинаміки НАН України, (044)366-24-39

Мистецкий Виктор Анатольевич, инженер 1 категории, Институт электродинамики НАН Украины, (044)366-24-39

Mystetskyi Viktor Anatoliyovych, engineer 1 categoru, Institute of electrodynamics of NAS Ukraine, +38(044)366-24-39

УДК 621.3.04

А. А. СТАВИНСКИЙ, Е. А. АВДЕЕВА, О.О. ПЛАХТЫРЬ, Р. А. СТАВИНСКИЙ, А. Н. ЦЫГАНОВ

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО МАЛОМАГНИТНОГО КОМПАКТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Показано можливість зниження зовнішнього магнітного поля, контурного об'єму і трудомісткості виробництва просторових аксіальних електромагнітних систем спеціальних трифазних трансформаторів і реакторів. Удосконалення досягається симетруванням положень фазних елементів в просторі при паралельних поверхнях суміжних стрижнів і спрощенням конфігурацій розгорток секцій і перерізів стрижнів відповідно витих і навито-шихтованих магнітопроводів при нетрадиційних утворюючих контурах стрижнів і обмоткових котушок.

Ключові слова: трифазний трансформатор, зовнішнє магнітне поле, компактність, магнітопровід, симетрування.

Показана возможность снижения внешнего магнитного поля, контурного объема и трудоемкости производства пространственных аксиальных электромагнитных систем специальных трехфазных трансформаторов и реакторов. Усовершенствование достигается симметрированием положений фазных элементов в пространстве при параллельных поверхностях смежных стержней и упрощением конфигураций разверток секций и сечений стержней соответственно витых и навито-шихтованных магнитопроводов при нетрадиционных образующих контурах стержней и обмоточных катушек.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, внешнее магнитное поле, компактность, магнитопровод, симметрирование.

Elements of electrical equipment are subject to environmental and special norms for limiting the levels of the external magnetic field and contour volume. The basics of the designs of most power three-phase transformers are electromagnetic systems by planar magnetic cores. In this case, the three-phase transformers in production without external compensation devices do not respond the requirements of electromagnetic compatibility. The aim of the work is to analyze the possibility of developing low-magnetic three-phase transformers and reactors. The concept of the symmetrization and transformation of the structures of the magnetic circuit elements are used. The unconventional design and technological solutions of variants of axial spatial electromagnetic systems with twisted and combined butt magnetic cores are grounded. Traditional planar and spatial magnetic cores are characterized by circular forming contours of rods and winding coils. Such contours extremely complicate the solution of the problem of symmetry of structures and positions of the elements of rods and yokes in the space. The replacement of circular forming contours by polyhedral and sectoral contours forms sections of parallel lateral surfaces of adjacent rods. These contours make it possible to balance the masses and dimensions of the rods, as well as the positions of the elements of the axial spatial magnetic cores in the space, which is a condition of practical non-magnetism. Relatively to analogs with circular forming contours, the laboriousness of producing magnetic circuits and increasing the compactness of the spatia1 electromagnetic systems of transformers and reactors with reduced labor input are also reduced.

Keywords: three-phase transformer, external magnetic field, compactness, magnetic core, symmetrization.

Постановка задачи. Современные распределительные трансформаторы должны быть энергосберегающими и изготавливаться на основе новых технических решений и материалов [1–3]. В дополнение к указанным силовым разрабатываются специальные трансформаторы, в частности маломагнитные и компактные, предназначенные для установки в полупроводниковые блоки и цилиндрические и сферические оболочки ограниченного диаметра объектов подводной и авиационно-космической техники [4–7]. Условия проектирования специального электрооборудования, например корабельного, содержат жесткие ограничения внешнего магнитного поля (ВМП) [4, 5–9]. Переменные и постоянные ВМП приводят к сбоям и отказам магнитометрических и электронных систем и регламентируются нормами электромагнитной совместимости [8]. Поэтому разработка конструкторско-технологических решений снижения ВМП силового электрооборудования, в частности трехфазных трансформаторов (ТТ) и реакторов (ТР), является актуальной задачей. Основные показатели технического уровня электрических машин и аппаратов [10–12] дополняются показателем электромагнитной совместимости – уровнем ВМП [4, 8].

Анализ основных достижений. В мировом производстве большинства ТТ используется планарная структура электромагнитной системы (ЭМС) (рис. 1, *а*). Разработаны и производятся также ТТ и ТР на основе симметричных пространственных радиальных (рис. 1, *б*) и аксиальных (рис. 1, *в*, *г*) структур.

Конфигурации обмоточных катушек и сечений стержней ЭМС вариантов структур (рис. 1) ТТ и ТР малой, средней и большой мощности образованы прямоугольными или криволинейными образующими контурами (ОК) [2, 10–12]. Прямоугольные ОК увеличивают среднюю длину витка и снижают электрическую прочность изоляции при малом радиусе округления угловых частей катушек. Круговая форма катушек создает минимальную среднюю длину витка при условии полного заполнения электротехнической сталью (ЭТС) криволинейного ОК. Однако высокий коэффициент заполнения кругового или эллиптического контура $К_{кк} = 0{,}927…0{,}931$ достигается расположением в сечении стержня 28–32 пакетов ЭТС изменяющейся ширины, что очень удорожает производство.

Освоение во второй половине прошедшего века выпуска анизотропной ЭТС способствовало организации производства ТТ и ТР структурных схем (рис. 1, *в*, *г*). При разработке конструкции их ЭМС также использованы круговые ОК, которые в комбинированном стыковом (шихтованные стержни, витые ярма на рис. 2, *а*) и витом (рис. 2, *б*) вариантах заполняются ЭТС с коэффициентом $К_{кк} \le 0{,}9$. Такие ОК создают полости между катушками и увеличивают металлоемкость магнитопроводов и габаритные диаметры $Д_{ккс(в)}$ пространственных ЭМС. Образец (со снятой крышкой) состоящих в производстве ТТ [13, 14] со стержневыми и яремными частями витых неразъемных секций магнитопровода (рис. 2, *б*) и вмотанными котушками обмоток показан на рис. 2, *в*. Согласно [2] наибольший эффект применения высокопроницаемых анизотропных и новых аморфных ЭТС достигается в пространственных ЭМС и перспективным направлением разработок новых серий транс-

© А.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, О.О. Плахтырь, Р.А. Ставинский, А.Н. Цыганов, 2018

форматоров является создание витых пространственных стыковых магнитопроводов.

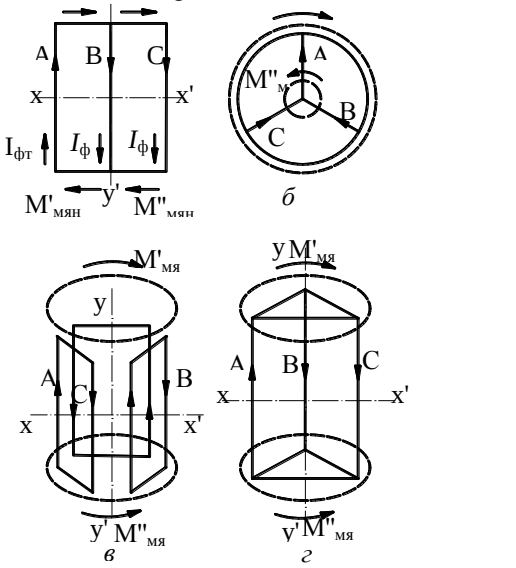


Рис. 1 – Структурные схемы статических электромагнитных систем: *а* – планарной; *б* – радиальной пространственной; *в* – аксиальной пространственный с двухконтурными фазными элементами; *г* – аксиальной пространственной с разделением фазного потока в ярмах

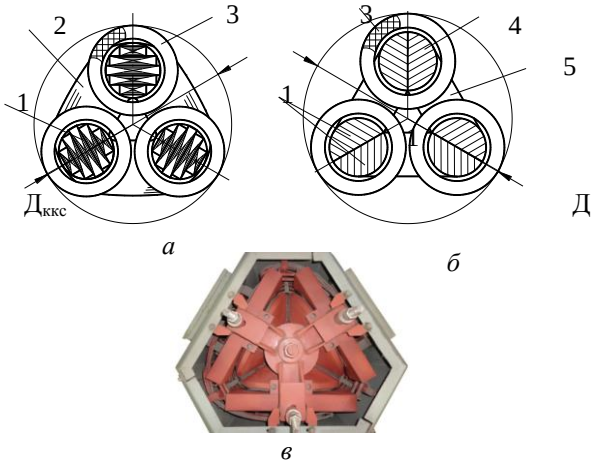


Рис. 2. – Конструктивные схемы (в поперечном сечении) трехфазных пространственных электромагнитных систем с комбинированным (*а*) и витым (*б*) магнитопроводами, а также вид сверху со снятой крышкой (*в*) трехфазного трансформатора ТСЗМ- 40-74.ОМ5 мощностью 40 кВ·А: 1 – стержень; 2- ярмо; 3 – катушка обмотки; 4 – стержневой участок секции магнитопровода; 5 – яремный участок секции магнитопровода.

В дополнение к отмеченным выше недостаткам круговых ОК теоретически и экспериментально установлено [15], что деформации изгиба и внутренние остаточные напряжения, возникающие при криволинейной намотке витков, складываются с напряжениями от электромагнитных сил при коротком замыкании ТТ. Наложение деформаций от двух упомянутых факторов создает суммарное напряжение по всей длине окружности каждого витка. Такие напряжения могут превышать допустимые значения. Поэтому криволинейные ОК снижают электродинамическую устойчивость ТТ и ТР.

Также установлено [4], что использование в ЭМС структуры (рис. 1, *в*) витого секционированного магнитопровода не позволяет решить задачу обеспечения электромагнитной совместимости. Поэтому необходимы новые подходы к разработке маломагнитных ТТ и ТР.

Цель работы. Анализ результатов исследований возможности разработки и обоснование вариантов решений ЭМС маломагнитных и компактных ТТ и ТР.

Изложение основного материала исследования. Замена круговых ОК элементов ЭМС на $n \geq 6$-гранные (рис. 3) позволяет упростить производство стыковых и витых магнитопроводов и повысить электродинамическую устойчивость индукционных статических устройств [10–12].

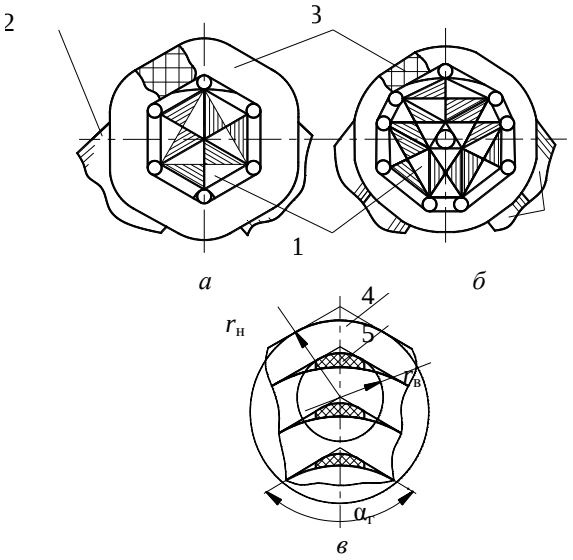


Рис. 3 – Фрагменты схем вариантов пространственных стыковых электромагнитных систем (*а*, *б*) и особенности конструкции обмотки (*в*) с многогранными образующими контурами: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки; 4 – виток; 5 – опорный элемент

Сборкой стержней (рис. 3, *а*) [16] из пластин толщиной 0,35 мм и шириной (0,1...1) м достигается заполнение шестигранного ОК с коэффициентом $К_{кш} = 0,997...0,999 \approx 1$. Конструкция (рис. 3, *б*) с центральными отверстиями стержней [17] обеспечивает возможность снижения массы магнитопровода схемы (рис. 1, *г*) формированием двухконтурных ярем. Создается возможность снижения материалоемкости и потерь ТТ и ТР относительно аналогов с круговыми ОК [10–12]. Линии прямых сторон витков между углами ОК катушек обмоток ЭМС (рис. 3, *а*, *б*) пересекаются под тупыми углами $α_г = 120°$ (рис. 3, *в*). В углах $α_г$ выполняются округления проводников. Между стержнями и катушками, а также проводниками, устанавливаются вертикальные опорно-изоляционные элементы. Устраняются (возникающие по всей длине витков цилиндрических катушек) деформации изгиба и остаточные механические напряжения волокон проводников в прямых участках витков. Зоны деформаций и напряжений концентрируются в местах изгиба проводников на осях вершин многогранника. Однако в этих зонах усиливается изоляция и устанавливаются опорные элементы. Для повышения электрической

прочности и динамической устойчивости опорные элементы должны выполняться с формой поперечного сечения, соответствующей внутреннему $r_в$ и наружному $r_н$ радиусам округлений проводников (рис. 3, *в*) [18].

В общем случае ВМП обусловлено концентрацией в активной части функционирующего объекта электрооборудования проводящих сред. Эти среды характеризуются вектором плотности тока $\bar{\delta}(\chi)$ и вектором намагниченности $\bar{j}(\chi)$ во всех точках χ активного объема V концентратора. Концентратор – ЭМС объекта создает ВМП, напряженность которого в любой точке пространства определяется уравнением [19]

$$\bar{H}(p) = rot\left[\frac{1}{4\pi}\int_V \frac{\bar{\delta}(\chi)}{r}dV\right] - \\ - grad\left[\frac{1}{4\pi}\int_V \left(\bar{j}(\chi)grad\left(\frac{1}{r}\right)\right)dV\right], \quad (1)$$

где r – расстояние от точки пространства P до координат интегрирования $\chi \in V$.

На основе (1) сосредоточенный (дипольный) источник магнитного поля определяется составляющими векторного магнитного момента (ВММ) ЭМС [19]

$$\bar{M}_\delta = \int_V \left[\bar{r}, \bar{\delta}(\chi)\right]dV; \quad \bar{M}_j = \int_V \left[j(\chi)\right]dV, \quad (2)$$

где $\bar{M}_\delta$ – дипольный ВММ, созданный всеми токами обмоток ЭМС; $\bar{M}_j$ – дипольный ВММ созданный всеми элементами магнитопровода.

Из (1), (2) следуют известные способы снижения ВМП в источнике. Такими способами являются уменьшение модулей $\delta(\chi)$ и $j(\chi)$ и соответственно электромагнитных нагрузок, уменьшение объема V и структурирование его элементов с целью компенсации или минимизации действия $\bar{\delta}(\chi)$ и $\bar{j}(\chi)$ [19].

Условие снижения плотности тока обмоток и индукции магнитопровода соответствует ухудшению массо-стоимостных показателей и противоречит условию повышения компактности ЭМС. Более эффективно преобразование структур и симметрирование ЭМС [10–12]. Преобразование заключается в построении такой пространственной топологии дислокаций $\bar{\delta}(\chi)$ и $\bar{j}(\chi)$, при которых достигается пространственная симметрия положений и конфигураций активных элементов. В случае заданной конструктивной асимметрии ЭМС снижение ВМП возможно только внесенными (компенсационными) источниками магнитного поля [19] с конструктивно-системным усложнением и увеличением потерь.

Результирующий ВММ ТТ состоит из обмоточной, стержневой и яремной компонент ЭМС. При условии фазной симметрии источника энергии, обмотки вариантов структур ЭМС (рис. 1) образуют на комплексной плоскости симметричную звезду фазных ВММ с результирующим нулевым значением. Однако пространственные положения фазных ВММ, обусловленных $\bar{\delta}(\chi)$, зависят от степени фазной симметрии магнитопровода. Также уровень ВМП зависит от пространственной симметрии фазных элементов магнитопровода идентичного назначения.

В [4] анализируются результаты разработки ТТ маломагнитного исполнения структурных систем (рис. 1, *а, в*). В связи с отличием контуров и длин замыкания силовых линий поля в различные моменты времени, в известных вариантах планарных ЭМС, намагниченности элементов, в частности стержневого магнитопровода (рис. 1, *а*), несимметричны. Намагниченности и ВММ ярем $М'_{мяв}$, $М''_{мяв}$ и $М'_{мян}$, $М''_{мян}$, при максимуме потоков одного из боковых стержней отличаются от их значений при максимуме потока среднего стержня. Поэтому возникает разностный ВММ, определяющийся в соответствии с обозначениями (рис. 1, *а*) выражением [4]

$$\Delta\bar{М} = I_{фт}W_ф\bar{S}_в\left(К_{умА(С)} - К_{умВ}\right), \quad (3)$$

где $I_{фт}$ и $W_ф$ – амплитуда фазного тока и число витков обмотки; $\bar{S}_в$ – вектор, численно равный средней площади витка в плоскости, перпендикулярной оси стержня; $К_{умА}$, $К_{умВ}$, $К_{умС}$ – коэффициенты усиления магнитного поля системы обмоток стержневыми и яремными участками магнитопровода $К_{умА} = К_{умС} \neq К_{умВ}$.

Разность (3) достигает больших величин даже при малом отличии $К_{умА(С)}$ и $К_{умВ}$ при значительных $I_{фт}$ и $W_ф$. Поэтому разработка маломагнитных ТТ и ТР на основе схемы (рис. 1, *а*) без компенсационных обмоток или короткозамкнутых колец на стержнях невозможна [4].

В ЭМС (рис. 1, *б*) составляющая ВММ, обусловленная намагниченностью наружного ярма $М'_я$ не уравновешена составляющей намагниченности внутреннего ярма $М''_я \neq М'_я$ и разработка маломагнитного ТТ радиальной структуры без средств магнитной компенсации также невозможна.

В соответствии с (1)–(3) очевидным решением задачи обеспечения маломагнитности ТТ является использование симметричных аксиальных пространственных структур ЭМС (рис. 1, *в, г*).

Выполненная разработка ТТ схемы (рис. 1, *в*) и конструкции (рис. 2, *б*) с вмотанными обмотками (неразъемные секции магнитопровода) показала близкую к нулю компоненту ВММ и ВМП в направлении оси *yy'*. Однако радиальные компоненты в направлении *xx'* достигли существенных величин. Анализ опытных образцов указанного ТТ показал, что традиционная вмотанная конструкция ЭМС (рис. 2, *б*) в значительной степени подвержена влиянию различных технологических отклонений от полной симметрии [4]. В идеальном случае технологические отклонения от симметричных положений трех секций и элементарных слоев ЭТС витого магнитопровода и фазных катушек обмоток в пространстве должны отсутствовать. Также конфигурации и массы секций и сечений стержней должны быть идентичными. Согласно [4], технология изготовления ЭМС (рис. 2, *б*) обеспечивает критичные

величины указанных отклонений ± 2 мм. При формировании магнитопровода ЭМС (рис. 2, *б*) практическую симметричность и идентичность секций (рис. 4, *а*) из разверток (рис. 4, *б*) или отдельных рулонов ЭТС различной ширины обеспечить весьма сложно.

Снизить на 15...20% габаритные размеры и трудоемкость производства ЭМС структуры (рис. 1, *в*) относительно аналога (рис. 2, *б, в*) из секций и разверток ЭТС (рис. 4, *а, б*) возможно на основе шестигранных ОК (рис. 4, *в*) [10–12]. Достигается контурный коэффициент заполнения ЭТС шестигранного ОК $k_{кш} \approx 1$. Создается возможность решения задачи симметрирования секций (рис. 4, *г*) магнитопровода ЭМС (рис. 4, *в*) и разработки маломагнитного ТТ изменением и упрощением конфигурации развертки (рис. 4, *б*) до вида (рис. 4, *д*). Секционные развертки (рис. 4, *д*) выполняются разделением прямоугольной полосы ЭТС на две идентичные части с прямоугольными *abda'* и *b'ee'd'*, а также треугольными *bcd* и *b'c'd'* участками [20]. При намотке секций образуются участки параллельных боковых поверхностей смежных стержней (обмоточных окон), что повышает компактность.

Замена (для повышения компактности ЭМС) вмотанной конструкции на стыковую (составные секции на рис. 4, *г*), позволяет снизить массу и основные потери магнитопровода, а также центрировать сборку витых частей относительно параллельных плоскостей *xx'* (рис. 1, *в*) и торцов магнитопровода.

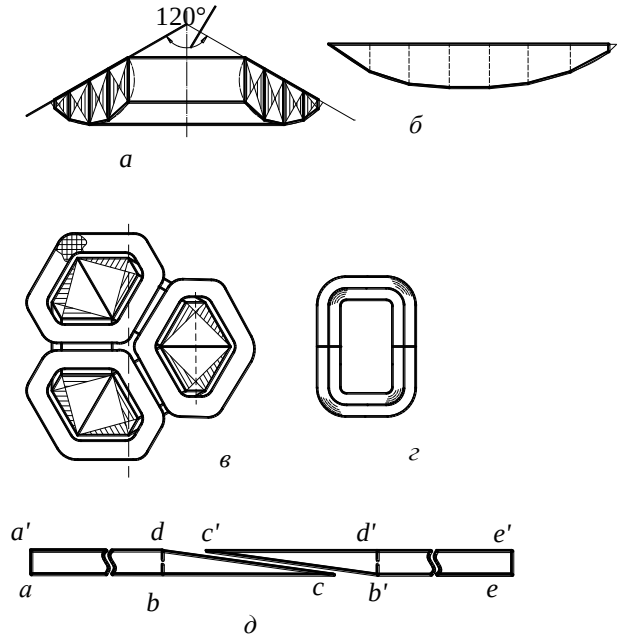


Рис. 4 – Схема (*а*) и развертка (*б*) секции витого магнитопровода с круговыми образующими контурами, схема (*в*), секция (*г*) и развертка (*д*)

электротехнической стали двух секций электромагнитной системы с шестигранными образующими контурами

Задача пространственного симметрирования положений катушек обмоток и элементов магнитопровода также может быть решена при использовании структуры ЭМС (рис. 1, *г*). Использование в подобной ЭМС традиционных круговых ОК (рис. 2, *а*) и выполнение стержней из пластин ЭТС различной ширины предельно затрудняют решение задачи обеспечения практических идентичности и симметричного положения элементов стержней в пространстве. Названные недостатки устраняются в вариантах симметричной ЭМС с минимальным контурным диаметром $Д_{кс(ш)}$ стыковых витого [21] и комбинированного [16] магнитопроводов соответственно с секторными и шестигранными ОК (рис. 5, *а, б*), позволяющих создать компактную конструкцию ТТ (рис. 5, *в*) с параллельными участками поверхностей смежных стержней и повышенной точностью сборки (рис. 5, *г–ж*).

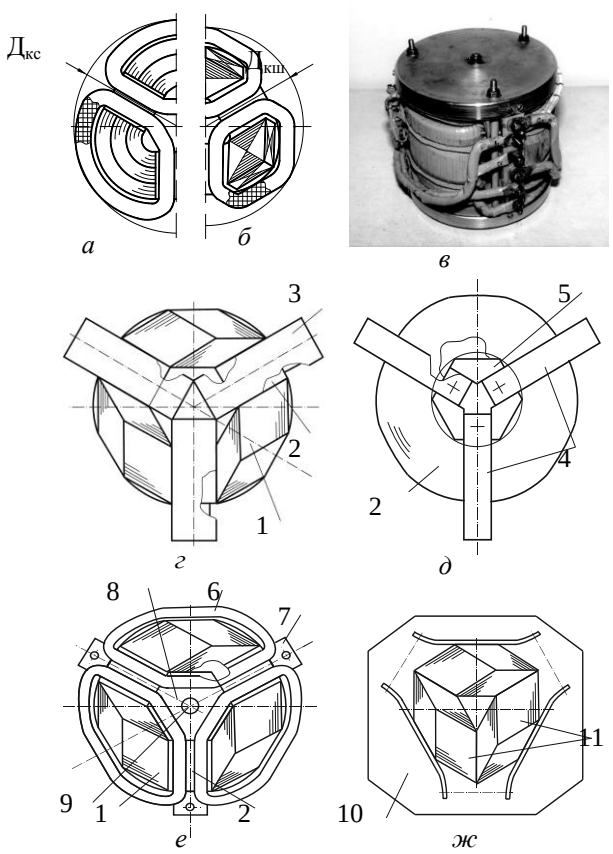


Рис. 5 – Конфигурации элементов аксиальной электромагнитной системы со стыковыми витым (*а*) и комбинированным (*б*) магнитопроводами, трехфазный трансформатор (*в*) и установка стержней, ярем и обмоточных катушек (*г*) – (*ж*) с использованием оправки (*д*) и основания (ж) при сборке:
1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – прокладка; 4 – оправка; 5 – выступ; 6 – обмоточная катушка; 7 – основание; 8 – выступ основания; 9 – отверстие; 10 – технологическое основание; 11 – стыковые поверхности стержней.

В табл. 1 приведены массогабаритные характеристики понижающих ТТ морского назначения мощностью 6,3 кВ·А с обмотками высокого напряжения 660 В – планарного ТСЗМ [13] и встраиваемого компактного ТПК (рис. 5, *в*) [5, 23] системы электрооборудования подводного самоходного спускаемого аппарата МТК – 200 [7].

Существенное различие масс трансформаторов обусловлено наличием стальных кожуха и стяжного остова магнитопровода в ТСЗМ и конструктивных

элементов из немагнитного легкого сплава АМГ – 5М в ТПК, а также лучшими показателями технического уровня пространственной ЭМС относительно эквивалентной планарной [11, 12].

Стержни витого стыкового магнитопровода ЭМС (рис. 5, *а*) выполняются симметричным разрезанием кольцевых концентрических витых заготовок, а варианты конструкции комбинированного магнитопровода (рис. 5, *б*, *г*) отличаются от схемы (рис. 2, *а*) идентичностью размеров пластин ЭТС стержней, что упрощает симметрирование и технологию изготовления.

Таблица 1 – Массогабаритные показатели вариантов трехфазного трансформатора

Тип трансформатора	Характеристика	
	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
ТСЗМ – 6,3 – 74.ОМ5	73	554х355х405 (по выступающим элементам крепления)
ТПК – 6,3 – 660/230/16	47	330х330х390

Нетрадиционные ОК создают параллельность боковых поверхностей смежных стержней (обмоточных окон). Такие поверхности обеспечивают возможность практического симметрирования активных элементов ЭМС способом сборки [22] и технологической оснасткой (рис. 5, *г–ж*).

Перед установкой стержней на осях ярем и обмоточных окон располагаются идентичные технологические прокладки (рис. 5, *г*) с параллельными сторонами и шириной, равной ширине окна. Стержни устанавливаются с совмещением боковых плоских поверхностей с поверхностями сторон прокладок. Прокладки устанавливаются, в соответствии с положением осей обмоточных окон, на технологическую оправку (вид с внешнего торца ярма) с центральным выступом (рис. 5, *д*).

Для возможности центрирования выступ оправки содержит участки внешней поверхности, предназначенные для установки ярма и совпадающие с поверхностью его внутреннего контура. Ярмо с установленными стержнями и обмоточными катушками и второе аналогичное ярмо закрепляются на несущих основаниях остова ТТ с центральными выступами и отверстиями, которые содержат поверхности с осями, совпадающими и соосными с участками поверхностей внутренних контуров ярем (рис. 5, *е*). При сборке ЭМС в отверстия выступов несущих оснований устанавливается технологический осевой направляющий элемент. Перед сборкой ЭМС заготовки стержней располагаются на технологическом основании с совмещением боковых плоских поверхностей и временно скрепляются (рис. 5, *ж*). Обрабатываются торцевые поверхности такой сборки для обеспечения идентичности высот всех стержней. Для симметричного положения обмоточных катушек устанавливаются горизонтальные и вертикальные дистанционные изолирующие прокладки.

Выводы. 1. Дальнейшее усовершенствование и обеспечение электромагнитной совместимости ТТ и ТР без средств электромагнитной компенсации достигается структурными преобразованиями активных элементов пространственных ЭМС.

2. Решение задачи достижения практической маломагнитности, повышения компактности и снижения трудоемкости производства пространственных конструкций ТТ и ТР возможно на основе вариантов нетрадиционных аксиальных структур ЭМС с параллельными участками боковых поверхностей смежных стержней.

Список литературы

1. *Мельникова Е. В.* Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных трансформаторов / *Е.В. Мельникова* // Энергосбережение. – 2004. – №1. – с. 61–66.
2. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий [Электронный ресурс] / *В.А. Бормосов, М.Н. Костоусова, А.Ф. Петренко, И.Е. Смольская*. Режим доступа: www. transform. ru/articles/html/03project/a000001.article(13.09.2004).
3. *Коновалов О.А.* Основные требования к трансформаторно-реакторному оборудованию в современных условиях / *О.А. Коновалов, В.И. Подъячев* // Энергетик. – 2010. – №8. – с. 29–31.
4. Анализ типичных ошибок проектирования трансформаторов в маломагнитном исполнении / *В.С. Лупиков, А.А. Середа, А.В. Ерисов, Н.В. Крюкова, О.А. Геляровская* // Електротехника і електромеханіка. – 2004. – №2. – с. 26–33.
5. *Ставинский А. А.* Особенности назначения и использования специальных электрических машин / *А. А. Ставинский* // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 53–58.
6. *Moore S.* / Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication / *S. Moore, H. Bohm, V. Jensen*. – Marine Advanced Technology Education (NATE) Center, 2010. – 770 p.
7. *Блинцов В. С.* Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования / *В.С. Блинцов, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, А.С. Садовой* // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – с. 16–21.
8. IEC 1000-4-8: 1993."Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring. – Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 61 p.
9. *Weston D. A.* Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuiys and Measurement, Third Edition, Third Edition / *D. A. Weston*.– Boca Raton: Taylor & Francis Group, CRC Press. – 2016. – 184 p.
10. *Ставинский А.А.* Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 1. Варианты и метод оценки преобразований / *А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева* / Электричество. – 2014. – № 9. – с. 34–43.
11. *Ставинский А.А.* Универсальный метод обоснованного выбора технических решений активной части электрических машин и аппаратов / *А.А.Ставинский, Р.А.Ставинский, Е.А.Авдеева, О.О.Пальчиков* // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії . – Х.: НТУ "ХПІ". – 2016. – №11(1183). – с. 70–79.
12. *Ставинский А.А.* Обобщенный метод структурно-параметрического синтеза электромагнитных систем электрических машин и индукционных аппаратов. Ч.1. Результаты сравнительного анализа вариантов трехфазных электромагнитных систем трансформаторов / *А.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, О.О. Пальчиков, Р.А. Ставинский* // Электричество. – 2017. – №4. – с. 39–49.
13. Трансформаторы серий ОСМ, ОСВМ, ОСВМС, ОСЗМ, ОСЗМВ, ТСВМ, ТСЗМ и ТСЗМВ (мощностью от 0,063 до 100 кВ·А). Техническое описание и инструкция по эксплуатации ОБТ. 140.240. – М.: Информэлектро, Зак. 1265. – 21 с.
14. Материалы информационного сайта "ОАО Электрозавод" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:/www.elektrozawod.ru/sites/default/files/production/catalog/pdf/additional/PK_5_8.pdf.
15. *Лазарев В.И.* Обобщение результатов исследования по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов

/ В.И. Лазарев // Технічна електродинаміка.–2005.– №1.– с.53–60.
16. Пат. 88883 України МПК HO1F 27/28 HO1F 27/24, HO1F 21/00. Просторова електромагнітна система / *А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський*. – №a200604817; Заявл. 03.05.2006; Опубл. 10.12.2009, Бюл. №23.
17. Пат. 91755 України МПК HO1F3/00, HO1F27/24. Магнітопровід трифазного статичного індукційного пристрою / *А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О. М. Циганов.* – №a200813522; Заявл. 24.11.2008; Опубл. 25.08.2010, Бюл. №16.
18. Пат. 39631 України МПК HO1F27/28; HO1F27/30; HO1F27/32. Обмотка статичного індукційного пристрою / *А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Циганов.* – №u200809425; Заявл.18.07.2008; Опубл. 10.03.2009. Бюл. №5.
19. *Розов В.Ю.* Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения / *В.Ю. Розов*. –Киев: 1995. – 42 с. – (препр. / НАН Украины. Ин-т Электродинамики; №772).
20. Пат. 99330 України МПК HO1F27/24. Спосіб виготовлення магнітопроводу трифазного статичного індукційного пристрою / *А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва*. – №U201414188; Заявл. 30.12.2014; Опубл. 25.05.2015, Бюл. №10.
21. Пат. 51437 України МПК HO1F27/24, HO1F29/14, HO1F27/26. Просторова магнітна система / *А.А. Ставинський, В.І. Крайнюк, Р.А. Ставинський, О.О. Плахтир*, – №2002042583; Заявл. 02.04.2002; Опубл. 17.01.2005, Бюл. №1.
22. Пат. 120851 України МПК HO1F27/24. Спосіб виготовлення магнітопроводу багатофазного індукційного статистичного пристрою / *А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, Д.О. Жук, О.О. Плахтир, Р.А. Ставинський*. – №u201703887 Заявл. 19.04.2017, Опубл. 27.11.2017, Бюл. №22.
23. *Ставинський А.А.* Розрахунок трифазних трансформаторов з просторовым магнітопроводом: Навчальний посібник / *А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.О. Плахтир*. – Миколаїв: НУК, 2004. – 106 с.

References (transliterated)

1. Mel'nikova E. V. Energosberezhenie v Evrope: primenenie energoeffektivnykh transformatorov [Energy saving in Europe: application of energy-efficient transformers] / E.V. Mel'nikova // *Energosberezhenie*. – 2004. – №1. – s. 61–66.
2. Perspektivy i sostoyanie razrabotok raspredelitel'nykh transformatorov massovykh seriy [Perspectives and state of development of distribution transformers of mass series] [Elektronnyy resurs] / V.A. Bormosov, M.N. Kostousova, A.F. Petrenko, I.E. Smol'skaya. Rezhim dostupa: www. transform. ru/articles/html/03project /a000001.article(13.09.2004).
3. Konovalov O.A. Osnovnye trebovaniya k transformatorno-reaktornomu oborudovaniyu v sovremennykh usloviyakh [Basic requirements for transformer-reactor equipment in modern conditions]/ O.A. Konovalov, V.I. Pod"yachev // *Energetik*. – 2010. – №8. – s. 29–31.
4. Analiz tipichnykh oshibok proektirovaniya transformatorov v malomagnitnom ispolnenii [Analysis of typical errors in the design of transformers in a low-magnetic version] / V.S. Lupikov, A.A. Sereda, A.V. Erisov, N.V. Kryukova, O.A. Gelyarovskaya // *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. – 2004. – №2. – s. 26–33.
5. Stavinskiy A. A. Osobennosti naznacheniya i ispol'zovaniya spetsial'nykh elektricheskikh mashin [Features of the destination and use of special electric machines]. / A. A. Stavinskiy // *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. – 2008. – № 2. – S. 53–58.
6. Moore S. / Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication / S. Moore, H. Bohm, V. Jensen. – *Marine Advanced Technology Education (NATE) Center*, 2010. – 770 p.
7. Blintsov V. S. Transformatory dlya vstraivaniya v obolochki ogranichennogo diametra ob"ektov spetsial'noy tekhniki i postanovka zadachi ikh usovershenstvovaniya [Transformers for embedding in shells of limited diameter objects of special equipment and setting the task of their improvement] / V.S. Blintsov, R.A. Stavinskiy, E.A. Avdeeva, A.S. Sadovoy // *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. – 2012. – №2. – s. 16–21.
8. IEC 1000-4-8: 1993."Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring. – Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 61 p.
9. Weston D. A. Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuiys and Measurement, Third Edition, Third Edition / D. A. Weston.– Boca Raton: Taylor & Francis Group, *CRC Press*. – 2016. – 184 p.
10. Stavinskiy A.A. Optimizatsionnyy sravnitel'nyy analiz struktur staticheskikh elektromagnitnykh sistem. Ch. 1. Varianty i metod otsenki preobrazovaniy [Optimization comparative analysis of the structures of static electromagnetic systems. Part 1. Variants and method for evaluating transformations] / A.A. Stavinskiy, R.A. Stavinskiy, E.A.Avdeeva / *Elektrichestvo*.– 2014. – № 9. – s. 34–43
11. Stavinskiy A.A. Universal'nyy metod obosnovannogo vybora tekhnicheskikh resheniy aktivnoy chasti elektricheskikh mashin i apparatov [The universal method for the reasonable selection of technical solutions for the active part of electrical machines and apparatus] / A.A.Stavinskiy, R.A.Stavinskiy, E.A.Avdeeva, O.O.Pal'chikov // *Visnik natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "KhPI". Zbirnik naukovikh prats'. Seriya: Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorennya energii* . – Kh.: NTU "KhPI". – 2016. – №11(1183). – s. 70–79.
12. Stavinskiy A.A. Obobshchennyy metod strukturno-parametricheskogo sinteza elektromagnitnykh sistem elektricheskikh mashin i induktsionnykh apparatov. Ch.1. Rezul'taty sravnitel'nogo analiza variantov trekhfaznykh elektromagnitnykh sistem transformatorov [Generalized method of structural-parametric synthesis of electromagnetic systems of electric machines and induction devices. Part 1. Results of a comparative analysis of variants of three-phase electromagnetic systems of transformers] / A.A. Stavinskiy, E.A. Avdeeva, O.O. Pal'chikov, R.A. Stavinskiy // *Elektrichestvo*. – 2017. – №4. – s. 39–49.
13. Transformatory seriy OSM, OSVM, OSVMS, OSZM, OSZMB, TSVM, TSZM i TSZMV (moshchnost'yu ot 0,063 do 100 kV·A). Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii OBT. 140.240. – M.: *Informelektro*, Zak. 1265. – 21 s.
14. Materialy informatsionnogo sayta "OAO Elektrozavod" [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: http:/www.elektrozawod.ru/sites/default/files/production/catalog/pdf /additional/PK_5_8.pdf
15. Lazarev V.I. Obobshchenie rezul'tatov issledovaniya po probleme elektrodinamicheskoy stoykosti silovykh transformatorov [Generalization of the research results on the problem of the electrodynamic stability of power transformers] / V.I. Lazarev // *Tekhnichna elektrodinamika*. – 2005. – №1. – s. 53–60.
16. Pat. 88883 Ukrayiny MPK NO1F 27/28 HO1F 27/24, HO1F 21/00. Prostorova elektromahnitna systema [Spatial electromagnetic system] / A.A. Stavyns'kyy, R.A. Stavyns'kyy. – №a200604817; Zayavl. 03.05.2006; Opubl. 10.12.2009, Byul. №23.
17. Pat. 91755 Ukrayiny MPK HO1F3/00, HO1F27/24. Mahnitoprovid tryfaznoho statychnoho induktsiynoho prystroyu [Magnetic conductor of a three-phase static induction device] / A.A. Stavyns'kyy, R.A. Stavyns'kyy, O. M. TSyhanov. – №a200813522; Zayavl. 24.11.2008; Opubl. 25.08.2010, Byul. №16.
18. Pat. 39631 Ukrayiny MPK HO1F27/28; HO1F27/30; HO1F27/32. Obmotka statychnoho induktsiynoho prystroyu [Winding of static inductive device] / A.A. Stavyns'kyy, R.A. Stavyns'kyy, O.M. TSyhanov. – №u200809425; Zayavl.18.07.2008; Opubl. 10.03.2009. Byul. №5.
19. Rozov V.Yu. Vneshnie magnitnye polya silovogo elektrooborudovaniya i metody ikh umen'sheniya [External magnetic fields of power electrical equipment and methods for reducing them] / V.Yu. Rozov. –Kiev: 1995. – 42s. – (prepr. / NAN Ukrainy. In-t Elektrodinamiki; №772).
20. Pat. 99330 Ukrayiny MPK HO1F27/24. Sposib vyhotovlennya mahnitoprovodu tryfaznoho statychnoho induktsiynoho prystroyu [Method for manufacturing a magnetic conductor of a three-phase static induction device] / A.A. Stavyns'kyy, R.A. Stavyns'kyy, O.A. Avdyeyeva. – №U201414188; Zayavl. 30.12.2014; Opubl. 25.05.2015, Byul. №10.
21. Pat. 51437 Ukrayiny MPK HO1F27/24, HO1F29/14, HO1F27/26. Prostorova mahnitna systema [Spatial magnetic system] / A.A. Stavyns'kyy, V.I. Kraynyuk, R.A. Stavyns'kyy, O.O. Plakhtyr, – №2002042583; Zayavl. 02.04.2002; Opubl. 17.01.2005, Byul. №1.
22. Pat. 120851 Ukrayiny MPK HO1F27/24. Sposib vyhotovlennya mahnitoprovodu bahatofaznoho induktsiynoho statystychnoho prystroyu [Method of manufacturing a magnetic core of multiphase inductive statistical device] / A.A. Stavyns'kyy, O.A. Avdyeyeva, D.O. ZHuk, O.O. Plakhtyr, R.A. Stavyns'kyy. – №u201703887 Zayavl. 19.04.2017, Opubl. 27.11.2017, Byul. №22.
23. Stavyns'kyy A.A. Rozrakhunok tryfaznykh transformatorov z prostorovым mahnitoprovodom [Calculation of three-phase transformers with spatial magnetic core: Training manual]:

Navchal'nyy posibnyk / A.A. Stavyns'kyy, R.A. Stavyns'kyy, O.O. Plakhtyr. – Mykolayiv: NUK, 2004. – 106 s.

Поступила (received) 23.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технічні рішення трифазного маломагнітного компактного трансформатора / А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, О.О. Плахтир, Р. А. Ставинський, О. М. Циганов // // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 116-122. – Библиогр.: 23 назв. – ISSN 2409-9295.

Технические решения трехфазного маломагнитного компактного трансформатора / А. А. Ставинский, Е. А. Авдеева, О.О. Плахтырь, Р. А. Ставинский, А. Н. Цыганов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"**.** – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 116-122. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2409-9295.

Technical solutions of three-phase low-magnetic compact transformer / A. A. Stavinskiy, O. A. Avdieieva, O.O. Plachtir, R. A. Stavinskiy, A. N. Tsiganov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 116-122. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ставинський Андрій Андрійович – доктор технічних наук, професор, Миколаївський національний аграрний університет, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки і електромеханіки; тел.: (0512) 36-49-63.

Ставинский Андрей Андреевич – доктор технических наук, профессор, Николаевский национальный аграрный университет, заведующий кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики; тел.: (0512) 36-49-63.

Stavinskiy Andrei Andreevich – doctor of technical sciences, full professor, Mykolayiv national agrarian university, head of the department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics; tel.: (0512) 36-49-63.

Авдєєва Олена Андріївна – кандидат технічних наук, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем; тел.: (0512) 36-05-15; e-mail: e.avdeeva@ukr.net.

Авдеева Елена Андреевна – кандидат технических наук, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, доцент кафедры судовых электроэнергетических систем; тел.: (0512) 36-05-15; e-mail: e.avdeeva@ukr.net.

Avdieieva Elena Andrieievna – candidate of technical sciences (Ph. D.), Admiral Makarov national university of shipbuilding, docent at the department of the shipboard electrical power systems; tel.: (0512) 36-05-15; e-mail: e.avdeeva@ukr.net.

Плахтир Олег Олегович – кандидат технічних наук, доцент, Миколаївський національний аграрний університет, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки і електромеханіки; e-mail: slygy78@mail.ru.

Плахтырь Олег Олегович – кандидат технических наук, доцент, Николаевский национальный аграрный университет, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики; e-mail: slygy78@mail.ru.

Plakhtyr Oleg Olegovich – candidate of technical sciences (Ph. D.), Mykolayiv national agrarian university, docent of the department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics; e-mail: slygy78@mail.ru.

Ставинський Ростислав Андрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем; тел.: (0512) 36-97-81; e-mail: strostand@mail.ru.

Ставинский Ростислав Андреевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, доцент кафедры судовых электроэнергетических систем; тел.: (0512) 36-97-81; e-mail: strostand@mail.ru.

Stavinskiy Rostislav Andreevich – candidate of technical sciences (Ph. D.), docent, Admiral Makarov national university of shipbuilding, docent at the department of the shipboard electrical power systems; tel.: (0512) 36-97-81; e-mail: strostand@mail.ru.

Циганов Олександр Миколайович – магистр, Миколаївський національний аграрний університет, асистент кафедри електроенергетики, електротехніки і електромеханіки; e-mail: potomkinske@gmail.com.

Цыганов Александр Николаевич – магистр, Николаевский национальный аграрный университет, ассистент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики; e-mail: potomkinske@gmail.com.

Tciganov Aleksandr Nikolaevich – master, Mykolayiv national agrarian university, assistant of the department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics; e-mail: potomkinske@gmail.com.

ЗМІСТ

Сторінка редактора 3
Милых В. И., Дзенис С. Е. Численно-полевой анализ эффективности эксцентриситета зазора под главными полюсами в двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением 4
Шинкаренко В. Ф., Шведчикова И. А., Котлярова В. В. Изотопия в структурной организации и эволюции электромеханических преобразователей энергии 14
Рымша В.В., Радимов И.Н., Гулый М.В., Бабич И.П., Калиниченко А.А., Фокин С.А. Разработка и исследование электромеханотронной системы малой мощности 26
Васьковський Ю. М., Гераскін О. А. Дослідження температурного поля і термомеханічних напружень в роторі асинхронного двигуна при ушкодженні короткозамкненої обмотки ротора 33
Кобзар К. О., Третяк О. В., Шуть О. Ю., Полієнко В. Р., Гакал П. Г., П'ятницька Є. С. Розроблення й впровадження перспективних методів розрахунку і моделювання при проектуванні та експлуатації потужних турбогенераторів та гідрогенераторів для ТЕС, АЕС, ГЕС, ГАЕС 38
Черников П. С. , Яровенко В. А., Зарицкая Е. И. Влияние параметров электроходов на показатели качества работы электроэнергетических установок при маневрировании 46
Еноктаев Р. Н. Корректировка расчета основных потерь в стали в регулируемых асинхронных двигателях 55
Болюх В. Ф., Кочерга А. И., Щукин И. С. Исследование комбинированных линейных импульсных электромеханических преобразователей ударно-силового действия 59
Заблодский Н. Н., Грицюк В. Ю., Клендий П. Б., Сорокин Д. С. Применение магнитной жидкости с фазовым переходом в погружных электромеханических преобразователях 67
Бурштинський М. В., Хай М. В., Харчишин Б. М. Непряме визначення обертального моменту досліджуваного електродвигуна 75
Попович О. М., Бібік О. В. Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насосу за застосування комплексного проектування 79
Гребеников В. В., Прыймак М. В. Исследование мотор-колеса для электромобиля с электродвигателем и редуктором на постоянных магнитах с учетом городского и загородного ездовых циклов 83
Поляков М. А., Андрияс И. А., Конограй С. П., Василевский В. В. Когнитивное управление жизненным циклом изоляции обмоток маслонаполненного силового трансформатора 90
Дунєв О. О., Єгоров А. В., Маслєнніков А. М., Юхимчук В. Д. Залежність величини обертового моменту тризубцевого двигуна з ротором, що котиться, від активної довжини його ротора 97
Мілих В. І., Шилкова Л. В. Чисельно-експериментальний аналіз магнітного поля індуктора магнітного сепаратора на базі асинхронного двигуна 104
Kuchynskyi K. A., Titko V. O., Hutorova M. S., Mystetskyi V. A. Mechanical processes in the terminal parts of the turbogenerator stator imbricated core in the presence of the tooth area pressing defects 110
Ставинский А. А., Авдеева Е. А., Плахтырь О. О., Ставинский Р. А., Цыганов А. Н. Технические решения трехфазного маломагнитного компактного трансформатора 116

Content

Editor page 3
Milykh V. I., Dzenis S. E. A numerical-field analysis of the eccentricity efficiency of the gap under the main poles in a DC motor with series excitation 4
Shynkarenko V., Shvedchykova I., Kotlyarova V. The isotopy in the structural organization and evolution of electromechanical energy converters 14
Rymsha V. V., Radimov I. N., Gulyy M. V., Babich I. P., Kalinichenko A. A., Fokin S. A. Development and investigation of the electromechanotronic system of low power 26
Vaskovskiy Y. N., Geraskin A. A. Investigation of the temperature field and thermomechanical stresses in induction motor rotor in case of damage of rotor short-circuited winding 33
Kobzar K. O., **Tretiak** ***O. V., Shut O. Yu., Poliienko V. R.,*** **Gakal** ***P. G., Pyatnitskaya Y. S.*** Development and implementation of promising methods and model engineering during the design and operation of powerful turbogenerators and hydrogenerators 38
Chernikov P. S., Yarovenko V. A., Zaritskaya E. I. Influence of electric ships' parameters on quality indices of electric power plants' performance at maneuvers 46
Yenoktaiev R.N. Correction of the calculation of the main losses in steel in controlled induction motor 55
Bolyukh V. F., Kocherga A. I., Shchukin I. S. Investigation of combined linear pulse electromechanical converters of impact-force action 59
Zablodskiy N. N., Gritsyuk V. Yu., Klendiy P. B., Sorokin D. S. A magnetic fluid application with a phase transition in a submersible electromechanical converters 67
Burshtynskyi M. V., Khai M. V., Kharchyshyn B. M. An indirect determination of the torque of the researched electric motor 75
Popovych O. M., Bibik O. V. Search and evaluation of ways to increase the energy efficiency of a monoblock pump in the application of complex design 79

Grebrnikov V. V., Priymak M. V. Study of a motor-wheel for an electric vehicle with an electric motor and a gear with permanent magnets, taking into account urban and countryside driving cycles 83
Poliakov M. O., Andriias I. A., Konogray S. P., Vasilevskij V. V. Cognitive management of oil-immersed power transformers winding insulations life cycle 90
Duniev O. O., Yehorov A. V., Masliennikov A. M., Yuhimchuk V. D. The dependence of three tooth motor with a rolling rotor torque value from the active length of its rotor 97
Milykh V. I., Shilkova L. V. Numerical-experimental analysis of the magnetic field of a magnetic separator inductor on the basis of an asynchronous motor 104
Kuchynskyi K. A., Titko V. O., Hutorova M. S., Mystetskyi V. A. Mechanical processes in the terminal parts of the turbogenerator stator imbricated core in the presence of the tooth area pressing defects 110
Stavinskiy A. A., Avdieieva O. A., Plachtir O. O., Stavinskiy R. A., Tsiganov A. N. Technical solutions of three-phase low-magnetic compact transformer 116

МІЖНАРОДНИЙ СИМПОЗІУМ – SIEMA’2017

ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

Відкриття симпозіуму – аудиторія та президія

СЕКЦІЯ «ПРОБЛЕМИ ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН»

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Збірник наукових праць

№ 5 (1281) 2018

Науковий редактор: Мілих В. І., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: Маслєнніков А. М., канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск Обухова Г. Б., канд. техн. наук

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра електричних машин
Тел.: (057) 707-65-14, (057) 707-68-44; e-mail: mvikemkpi@gmail.com

Обл.-вид. № 15 - 18 .

Підп. до друку 27.04.2018 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 16,28. Облік.-вид. арк. 16,7.
Тираж 100 пр. Зам. № 23. 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

Видавець і виготовлювач: ФОП Панов А. М.
Свідоцтво серії ДК №4847 від 06.05.2015 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць (Раднаркомівська), 10, оф. 6
тел.+38(057)714-06-74, +38(050) 976-32-87
copi@vlavke.com.ua, http://vlavke.com.ua