

ISSN 2074-212X

науково-практичний
журнал

2013/1 II

Електротехніка і електромеханіка

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Електричні машини та апарати

Силова електроніка

Теоретична електротехніка

Техніка сильних електрических та магнітних полів

Електричний транспорт

Електричні станції, мережі і системи

Ювілеї





ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Баранов М.И.	Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 12: классическая электродинамика	3
---------------------	--	----------

Електричні машини та апарати

Безотосный В.Ф., Козлов В.В., Набокова О.В.	Неразрушающий экспресс контроль механических напряжений	8
Василів К.М.	Порівняльний аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку під час роботи на активно-індуктивне навантаження	12
Голенков Г.М., Аббасиан М.	Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов на бегуне	17
Голенков Г.М., Пархоменко Д.І.	Розподіл магнітної індукції лінійного синхронного двигуна з магнітним підвісом	22
Дубинин В.А., Шайда В.П., Дубинина О.Н.	Прогнозирование спроса на машины постоянного тока с использованием формализованных моделей на базе кривых роста	26
Заблодский Н.Н., Грицюк В.Ю., Кулдыркаев И.Н.	Особенности распределения вихревых токов в полом перфорированном роторе полифункционального электромеханического преобразователя	30
Лущик В.Д., Кириянов В.В., Полезін С.Ю.	Електромагнітний розрахунок трифазних асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою	35
Шведчикова И.А.	Расчет магнитного поля подъемного электромагнита методом конформных преобразований	38

Силова електроніка

Жемеров Г.Г., Ільїна Н.А., Тугай Д.В., Холод О.І.	Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии	41
--	---	-----------

Теоретична електротехніка

Боев В.М.	Сверхпроводимость и измерение внешних магнитных полей электрооборудования. Часть 2. Схемы и технология измерений	50
------------------	--	-----------

Техніка сильних електрических та магнітних полів

Байда Е.И.	Сравнительный анализ параметров составного индуктора для магнитно-импульсной обработки материалов	52
Винников Д.В., Озеров А.Н., Юферов В.Б., Сакун А.В., Корытченко К.В., Месенко А.П.	Экспериментальное исследование электрического разряда в жидкости, создаваемого между электродами с конусной выемкой	55
Гнатов А.В.	Индукционная индукторная система с круговым витком с разрезом между двумя тонкостенными металлическими листами	61

Електричний транспорт

Устенко А.В., Пасько О.В.	Тенденции развития тяговых двигателей подвижного состава	65
--------------------------------------	--	-----------

Електричні станції, мережі і системи

Шклярский Я.Э., Скамын А.Н.	Проблемы высших гармоник в сетях промышленных предприятий	69
--	---	-----------

Ювілеї

Михайлов В.М.	К 70-летию со дня рождения	72
Клименко Б.В.	К 70-летию со дня рождения	73

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Звертаємо вашу увагу, що починаючи з 2006 року журнал виходить шість разів на рік. Вартість передплати на рік – 136,44 грн., на два місяці – 22,74 грн., на чотири місяці – 45,48 грн., на шість місяців – 68,22 грн., на вісім місяців – 90,96 грн., на десять місяців – 113,7 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перерегистровано постановою президії ВАК України від 10 лютого 2010 р. № 1-05/1. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.

Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу «Електротехніка і Електромеханіка» та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВІНІТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВІНІТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВІНІТИ. Згідно з цим договором ВІНІТИ надає редакції журналу звіт про відображення статей з журналу у РЖ та БД ВІНІТИ.

Починаючи з №1 за 2006 р. згідно з Наказом МОН України №688 від 01.12.2005 р. журнал надсилається до УкрІНТЕІ.

Електронна копія журналу «Електротехніка і Електромеханіка», який зареєстровано у Міжнародній системі реєстрації серійних (періодичних) видань під стандартизованим кодом ISSN 2074-272X, надсилається до Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського. Електронна версія журналу представлена на сайті <http://nbiuv.ton.gov.ua> в розділі «Інформаційні ресурси / Наукова періодика України» починаючи з 2009 року.

Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів відповідно до Вимог, які наведені на офіційному сайті НТУ «ХПІ» (<http://www.kpi.kharkiv.edu/eie/>). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.

М.І. Баранов

АНТОЛОГІЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 12: КЛАССИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Наведено короткий нарис з усесвітньої історії розвитку в 18-20 століттях класичної електродинаміки.

Приведен краткий очерк из всемирной истории развития в 18-20 веках классической электродинамики.

1. КРАТКИЙ ПЕРЕЧЕНЬ ОТКРЫТЫХ ЗАКОНОВ И СОЗДАННЫХ ИЗОБРЕТЕНИЙ К СЕРЕДИНЕ 19-го ВЕКА В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

К середине 19-го столетия учеными-физиками мира было открыто немало законов и накоплено большое количество экспериментальных фактов, связанных с природными (искусственными) электрическими и магнитными явлениями [1, 2]. Так, согласно данным [1, 2] в 1729 году С. Грэйем была открыта **электростатическая индукция** и установлено **явление электропроводности физических тел**. В 1733 году Ш. Дюфе ввел физические понятия **двух родов электричества**. В 1745 году П. Мушенбруком был построен первый накопитель электричества – **электрический конденсатор** ("лейденская банка"). В 1750 году Б. Франклином были введены понятия "**положительного**" и "**отрицательного**" вида **электричества**, создана описательная **унитарная теория электричества** и был сформулирован **закон сохранения электрического заряда**, подтвержденный опытным путем в 1843 году М. Фарадеем, об фундаментальных результатах многочисленных экспериментальных исследований которого в области физики было подробно изложено в [3]. В 1785 году Ш. Кулоном был установлен основной **закон взаимодействия неподвижных точечных электрических зарядов**. Далее в 1786 году Л. Гальвани открыл **постоянный электрический ток**. В 1800 году А. Вольта создал первый длительно работающий **источник постоянного электрического тока**. В 1820 году Х. Эрстед открыл **наличие у металлического проводника с электрическим током внешнего магнитного поля** и тем самым положил начало такому разделу физики как электромагнетизм. В том же 1820 году А. Ампер (рис. 1) сформулировал закон взаимодействия электрических токов (**закон Ампера**), что фактически и привело к возникновению в классической физике ее нового раздела – **электродинамики** [1, 2].

Кроме того, в 1820 году А. Ампером была разработана **теория магнетизма**, в соответствии с которой любые магнитные взаимодействия тел сводятся к взаимодействию скрытых в этих телах круговых молекулярных токов, каждый из которых эквивалентен плоскому магниту (**теорема Ампера**) [1]. Этот великий физик доказательно указывал на тесную взаимосвязь между электрическими и магнитными явлениями. Он активно проводил в электрофизическую практику токовую идею происхождения магнетизма. В 1822 году им был открыт **магнитный эффект катушки** с постоянным электрическим током, что дало возможность вскоре создать **первый спиральный многовитковый соленоид** с электрическим током.



Рис. 1. Выдающийся французский физик Андре Ампер (1775-1836 гг.), ставший одним из основоположников классической электродинамики

Он показал эквивалентность этого соленоида с током постоянному магниту и выдвинул идею усиления постоянного магнитного поля соленоида при помощи размещения внутри него железного сердечника из мягкого железа [1]. Отметим, что именно А. Ампер предложил в 1820 году использовать электромагнитные явления для передачи на расстояние электрических сигналов. На основе этой физико-технической идеи им в 1829 году был изобретен **электромагнитный телеграф** [1]. В уже не раз указанном 1820 году для магнитного поля металлического проводника с электрическим током был установлен **закон Био-Савара-Лапласа**. В 1826 году выдающимся немецким ученым-физиком Георгом Омом (рис. 2), долгие годы проработавшим школьным учителем физики и математики, экспериментальным путем было сделано важнейшее научное открытие в области электричества – знаменитый закон, устанавливающий связь между силой электрического тока J , электрическим напряжением U и электрическим сопротивлением R цепи (**закон Ома**) [1].



Рис. 2. Выдающийся немецкий электрофизик Георг Ом (1787-1854 гг.), заложивший научные основы теоретической электротехники

В 1830 году известный немецкий ученый Карл Гаусс (1777-1855 гг.) сформулировал **основную теорему электростатики**, согласно которой поток вектора электрической индукции \mathbf{D} через замкнутую поверхность S прямо пропорционален полному свободному электрическому заряду Q , заключенному внутри объема вещества, охватываемого указанной замкнутой поверхностью S (**теорема Гаусса**) [1, 2].

В 1831 году великим английским физиком М. Фарадеем (1791-1867 гг.) экспериментально было открыто фундаментальное **явление электромагнитной индукции**, связанное с возникновением электродвигущей силы в проводящем электрическом контуре при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную этим контуром. О данном явлении, на котором базируется вся прикладная электротехника и электроэнергетика, автором было развернуто указано ранее в [3]. В 1833 году Э. Ленцем, первым экспериментально исследовавшим в России индукционные электрические токи в металлических проводниках и выполненных из них многовитковых катушках, было открыто знаменитое "**правило Ленца**". В 1833 году М. Фарадеем были открыты основные законы электролиза, а в 1837 году им была обнаружена **поляризация диэлектриков**, обуславливающая влияние диэлектрика на электрическую емкость конденсатора [1, 2]. В 1832 году И. Пикси построил первый **генератор переменного тока**, использующий принцип электромагнитной индукции. В этот же период М. Фарадей в своих "Новых воззрениях, подлежащих в настоящее время хранению в архивах Королевского общества" [1, 3], обнародованных лишь в 1938 году, высказал гениальную мысль о распространении электрического и магнитного действия в виде колебаний через промежуточную среду (фактически предсказал **существование электромагнитных волн**) и ввел новое физическое понятие – **понятие диэлектрической проницаемости** ϵ среды. В 1834 году Б. Якоби построил в России первый практический электромотор постоянного тока – **электродвигатель с вращающимся валом**. В этом же году М. Фарадей **постулировал существование ионов** и сконструировал **вольтметр**. В 1842 году усилиями Дж. Джоуля и Э. Ленца был открыт **закон теплового действия на проводник электрического тока**. В 1845 году В. Вебер установил **закон взаимодействия двух движущихся электрических зарядов**, а Г. Кирхгоф определил **закономерности в распределении электрического тока в разветвленных цепях** [1, 2]. В 1845 году М. Фарадей открыл магнитное вращение плоскости поляризации дневного света (**эффект Фарадея**). В 1851 году Г. Румкорф создал первую индукционную катушку – высоковольтный электрический трансформатор (**катушку Румкорфа**). В 1848 году В. Вебер построил первый электродинамометр. В 1852 году М. Фарадей отчетливо сформулировал в физике **фундаментальную концепцию поля**, хотя само понятие поля им было введено еще в 30-х годах 19-го столетия. В 1853 году У. Томсон развил **теорию электрических колебаний в электрической цепи**, содержащей конденсатор и катушку, и получил знаменитую формулу для периода T собственных колебаний электрического

тока в зависимости от величины емкости C и индуктивности L цепи: $T=2\pi(LC)^{1/2}$. В 1854 году Л. Фуко обнаружил нагревание сплошного металлического тела, находящегося в переменном электрическом поле. Этот **физический эффект нагрева проводника переменным электрическим полем** он объяснил возбуждением в нем (этом проводнике) индукционных электрических токов, названных впоследствии учеными "**токами Фуко**". Для уменьшения данных электрических токов в сплошных телах им был предложен простой и надежный технический способ – разделение этих тел на отдельные части. В 1856 году У. Томсон обнаружил изменение электропроводности металлов под действием внешнего магнитного поля (**явление магнетосопротивления**), а точные количественные измерения магнетосопротивления были выполнены в 1866 году В. Беетцем, экспериментально подтвердившим рост электросопротивления металла в продольном внешнем магнитном поле [1]. В 1859 году Ю. Плюккером были открыты **катодные лучи в электроразрядной трубке** [1, 2]. Вот тот весьма неполный перечень сделанных мировым сообществом ученых-первоходцев основных научных открытий и технических изобретений к середине 19-го века в области теории и практики электричества, который со стороны ведущих электрофизиков мира остро нуждался в их осмыслении, обобщении и объединении в единую научную систему электрофизических знаний.

2. СОЗДАНИЕ НОВОЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Ведущими европейскими учеными (например, А. Ампером, В. Вебером, Ф. Нейманом и др.) в 19-ом столетии предпринимались многократные попытки создания теории электродинамических взаимодействий между физическими телами с электрическим током на основе ньютоновской "концепции дальнодействия" (мгновенного действия на расстоянии одного тела на другое без промежуточной среды), приводящие к появлению в рассматриваемой системе физических тел электродинамических сил, противоречащих третьему закону Ньютона [1]. Здесь, по мнению автора, попутно следует заметить и о том, что попытки применения различными учеными ньютоновской механики к объяснению в физике оптических явлений также оказались малоуспешными. При этом оказалось невозможным построить картину сил, действующих в пространстве между весомой материей и невесомым всепроникающим эфиром, явившимся в волновой теории света того времени, появившейся почти одновременно с корпускулярной теорией света, носителем волнового движения.

За создание общей теории электромагнитных процессов во второй половине 19-го века активно взялся талантливый английский физик Дж. Максвелл (рис. 3), разработавший за период 1860-1865 гг. на основе новых физических идей **теорию электромагнитного поля**, ставшую научной основой современной теории электромагнетизма, базирующейся на классических принципах физики [1-4]. Здесь необходимо подчеркнуть то, что именно из высокоразвитых интуитивных наглядных представлений от 1834 года современника физика-теоретика Дж. Максвеля и

великого физика-экспериментатора прошлых лет М. Фарадея о силовых магнитных линиях выкристаллизовалось **понятие поля**, имеющее фундаментальное значение для современной физики [5]. По мнению выдающегося немецкого (американского) физико-теоретика Альберта Эйнштейна (1879–1955 гг.) **физическая идея поля** М. Фарадея является самым важным научным открытием в мировой науке со временем выдающихся научно-технических достижений в механике и физике гениального английского ученого-универсала Исаака Ньютона (1643–1727 гг.) [1]. Использование идеи поля в науке "разорвало" схоластические рамки чисто механического описания явлений природы. В представлениях И. Ньютона и его научных последователей окружающее пространство являлось пассивным вместилищем материи: физических тел, молекул, атомов и электрических зарядов.



Рис. 3. Выдающийся английский физик Джеймс Максвелл (1831–1879 гг.), ставший основоположником новой теории электромагнетизма

В представлениях же М. Фарадея данное пространство должно было принимать непосредственное участие в протекающих в нем механических, электрических и магнитных явлениях. Приведем ниже слова выдающегося российского физика-теоретика, академика АН СССР Игоря Евгеньевича Тамма (1895–1971 гг.), касающиеся рассматриваемой идеи М. Фарадея [1, 5]: "Созданное Фарадеем в противовес господствующим теориям дальнодействия представление о силовых линиях полностью оправдало себя на деле: оно оказалось верным руководителем Фарадея на пути его многочисленных блестящих открытий". С 1865 года материя стала выступать не только в виде вещества, а и виде поля. Поля физики стали придавать смысл объективной физической реальности [1, 2].

В разработанной Дж. Максвеллом **теории электромагнитного поля** электромагнитные явления стали подчиняться пространственно-временным закономерностям. Вся совокупность этих закономерностей классической электродинамики со временем (к 1890 году с учетом дальнейших теоретических предложений и дополнений в эту теорию выдающегося немецкого физика Генриха Герца (1857–1894 гг.) и выдающегося английского физика Оливера Хевисайда (1850–1925 гг.) [4]) в системе СИ стала подчиняться для покоющихся сред следующей широко известной классической системе фундаментальных уравнений Максвелла [6, 7]:

$$\text{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \partial \mathbf{D} / \partial t; \quad (1)$$

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t; \quad (2)$$

$$\text{div} \mathbf{B} = 0; \quad (3)$$

$$\text{div} \mathbf{D} = \rho, \quad (4)$$

где \mathbf{E} , \mathbf{H} – соответственно векторы напряженности электрического и магнитного полей; $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ – соответственно векторы электрической и магнитной индукции; γ , ϵ , μ – соответственно удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости материала среды, в которой распространяется электромагнитное поле; ρ – объемная плотность свободного электрического заряда среды; t – текущее время.

Уравнение (1), обычно называемое первым уравнением Максвелла, является обобщением закона Ампера для переменного поля и свидетельствует о возбуждении магнитного поля электрическим током проводимости и переменным электрическим полем. В этом уравнении содержится оригинальная физическая идея Дж. Максвелла – к электрическому току, обусловленному переносом электрического заряда (первое слагаемое в правой части уравнения), он добавил так называемый ток смещения (второе слагаемое в правой части уравнения), вызываемый переменным электрическим полем. Уравнение (2), являющееся вторым уравнением Максвелла, вытекает из математической формулировки закона электромагнитной индукции Фарадея. Уравнение (3), выступающее в качестве третьего уравнения Максвелла, отражает отсутствие в природе магнитных зарядов и соответственно подчеркивает непрерывность магнитных силовых линий (линий индукции магнитного поля). Уравнение (4), ставшее четвертым уравнением Максвелла, соответствует известной электростатической теореме Гаусса, свидетельствует о прерывности силовых линий напряженности электрического поля, обобщает знаменитый закон Кулона для электрических зарядов и подчеркивает присутствие в природе этих зарядов. В итоге Дж. Максвеллу удалось построить замкнутую систему дифференциальных уравнений для напряженностей электрического и магнитного полей, переставших теперь быть несвязанными друг с другом. С этого времени эти поля предстали в физике в качестве единого и целого электромагнитного поля. Полученные Дж. Максвеллом уравнения (1)–(4) указывали на то, что электромагнитное поле может распространяться в свободном пространстве в виде **поперечных электромагнитных волн** (к этой новой физической идеи он пришел независимо от М. Фарадея в 1864 году [1, 4, 7]). Так исторически ньютоновская "концепция дальнодействия" уступила место **максвелловской "концепции близкодействия"**, согласно которой взаимодействия физических тел в пространстве происходят благодаря полям, распространяющимся с конечной скоростью. В своем завершенном виде теория электрических и магнитных явлений, изложенная Дж. Максвеллом на основе представлений об электромагнитном поле, была опубликована ее автором в 1873 году в фундаментальной книге "*Трактат об электричестве и магнетизме*" [1, 8]. Созданной новой теорией электромагнетизма для неподвижных сред выдающийся английский физик Дж. Максвелл навеки обессмертил свое имя в истории

всемирной науки.

Из уравнений Максвелла вытекало, что световое излучение (обычный дневной свет) можно рассматривать как распространение электромагнитного возмущения (к этой новой физической идее Дж. Максвелл пришел в 1861 году [1, 3]). Его указанные выше новые физические идеи, касающиеся тока смещения в веществе, существования в свободном пространстве электромагнитных волн и электромагнитной природы света, оказались настолько необычными и по сути научно-революционными, что ученые-современники Дж. Максвелла были ими просто обескуражены и шокированы. Из-за этого они их сразу не приняли и многие годы относились к новой теории электромагнитного поля настороженно и с подозрением.

Экспериментальные исследования выдающегося немецкого физика Г. Герца на созданной им высоковольтной электроустановке (рис. 4), генерирующей высокочастотные электрические колебания частотой до 100 МГц в открытой первичной *RLC*-цепи (вибраторе Герца [1, 4]), позволили ему в 1888 году получать и надежно регистрировать с помощью открытого вторичного электрического контура (резонатора Герца [1, 4]) в воздушном пространстве его лабораторного помещения **электромагнитные волны** метрового диапазона [2]. Проведенное Г. Герцем длительное и тщательное опытное изучение этих электромагнитных волн радиодиапазона (установление их свойств попечности, показателей отражения, преломления, поляризации и определение скорости их распространения в воздухе) позволило ему констатировать физическую тождественность полученных им электромагнитных волн световым. Выдающиеся научные результаты талантливого немца Г. Герца явились экспериментальным доказательством справедливости теории электромагнитного поля, разработанной ранее одаренным от природы англичанином Дж. Максвеллом.



Рис. 4. Внешний вид уникальных элементов высоковольтной электроустановки Г. Герца для получения им в 1888 году в лабораторных условиях электромагнитных волн [2]

Отметим, что указанные результаты исследований Г. Герца позволили также на базе воздушного вибратора Герца заложить научно-технические основы в области радиотехники для будущего практического осуществления в массовом масштабе при по-

мощи искровых радиостанций генерирования электромагнитных волн частотного радиодиапазона [5].

Другим серьезным аргументом в пользу достоверности теории электромагнитного поля Максвелла для неподвижных сред явились экспериментальные данные от 1899 года выдающегося российского физика Петра Николаевича Лебедева (1866-1912 гг.), касающиеся измерения им **давления света на твердые тела** [1, 2]. Согласно данным из [2] до рассматриваемой теории электромагнетизма Максвелла физическая реальность окружающего нас мира описывалась учеными как движение материальных точек при помощи обыкновенных дифференциальных уравнений классической механики. После создания теории электромагнитного поля Максвелла эта физическая реальность ученым представлялась уже в виде совокупности непрерывных полей, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных. Эта электромагнитная теория привела к глубоким превращениям и изменениям в самом основании (фундаменте) классической физики со временем великого ученого средневековья И. Ньютона [2]. В связи с этим принципиальным моментом в физических взглядах ученых выдающийся физик-теоретик 20-го столетия А. Эйнштейн в свое время сказал следующее [2]: "Формулировка максвелловских уравнений явилась чрезвычайно важным событием не только благодаря ценности их содержания, но и потому, что они дали образец нового типа законов".

Можно говорить о том, что классическая электродинамика, зародившаяся в "золотом" для электричества 19-ом веке, стала той первой областью научных знаний людей, где физиками при описании макроскопических электромагнитных процессов в веществе были впервые использованы **полевые физические взгляды и концепции**, получившие в настоящее время во многих областях науки и техники широкое распространение и физико-техническое применение.

3. ПОСЛЕДУЮЩИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

К 1909 году выдающийся нидерландский физик-теоретик Хендрик Лоренц (1853-1928 гг.) обобщил макроскопические уравнения электромагнитного поля Максвелла, относящиеся к неподвижным физическим телам, и экстраполировал их на микроскопические электромагнитные поля, создаваемые отдельными заряженными микрочастицами вещества [1, 2]. Результатом такого обобщения в период 1880-1909 гг. стало создание Х. Лоренцем **классической электронной теории**, описывающей электрические, магнитные и оптические свойства вещества и протекающие в нем электромагнитные явления на основе анализа движения дискретных электрических зарядов (**уравнения Лоренца-Максвелла**). Данную электронную теорию Х. Лоренц использовал для разработки **электродинамики движущихся сред**, базирующейся на синтезе классической теории электромагнитного поля Максвелла для неподвижных сред и классической электронной теории, учитывающей движение исследуемых сред. С помощью этой теории Х. Лоренц получил известное выражение для **электродинамической си-**

лы, действующей на движущийся электрический заряд в электромагнитном поле, а также объяснил зависимость электропроводности вещества от его теплопроводности и развел **теорию дисперсии света** [1, 2]. Кроме того, благодаря указанной теории Х. Лоренц научно предсказал явление расщепления спектральных линий вещества в сильном магнитном поле. После того, как выдающийся нидерландский физик-экспериментатор Питер Зееман (1865-1943 гг.) в 1896 году открыл явление расщепления спектральных линий в магнитном поле (**эффект Зеемана**) Х. Лоренцем на основе упомянутой электронной теории уже в 1897 году была разработана теория этого физического эффекта. Важно отметить, что в 1902 году П. Зееман и Х. Лоренц за исследование влияния магнетизма на процессы излучения были удостоены Нобелевской премии по физике [1, 2]. Здесь следует указать, что в 1904 году Х. Лоренц при разработке электродинамики движущихся тел получил аналитические зависимости, связывающие между собой пространственные координаты и моменты времени одного и того же события в двух различных инерциальных системах отсчета (**преобразования Лоренца**), а также вывел формулу зависимости массы электрона от его скорости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подытоживая в этом весьма коротком научно-историческом очерке, посвященном известным научно-техническим событиям в области классической электродинамики, можно заключить, что:

1. В начале 20-го столетия активными творческими усилиями многих выдающихся физиков-теоретиков и физиков-экспериментаторов была создана электродинамическая картина окружающего нас сложного мира, описываемая теориями классической электродинамики.

2. На основе новой теории электромагнетизма – классической теории электромагнитного поля Максвелла, разработанной во второй половине 19-го века для неподвижных физических тел (для электродинамики покоящихся сред), к началу 20-го столетия была создана усовершенствованная теория электромагнитного поля Лоренца, справедливая для движущихся физических тел (для электродинамики движущихся сред).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
2. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
3. Баранов М.И. Майкл Фарадей и его научные заслуги перед человечеством // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 6. – С. 3-12.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
5. Тамм И.Е. Собрание научных трудов. Том 2. – М.: Наука, 1975. – С. 330-333.
6. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
7. Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: Гостехиздат, 1954. – 687 с.
8. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. I-II, Clarendon Press, Oxford, 1873. –1011 p.

Bibliography (transliterated): 1. Kudryavcev P.S. Kurs istorii fiziki. – M.: Prosveschenie, 1974. – 312 s. 2. Hramov Yu.A. Istorya fiziki. – Kiev: Feniks, 2006. – 1176 s. 3. Baranov M.I. Majkl Faradej i ego nauchnye zaslugi pered chelovechestvom // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2009. – № 6. – S. 3-12. 4. Baranov M.I. Izbrannyye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 1: `Elektrofizika i vydayuschesya fiziki mira.–Har'kov: Izd-vo NTU "HPI",2008.–252 s. 5. Tamm I.E. Sobranie nauchnyh trudov. Tom 2. – M.: Nauka, 1975. – S. 330-333. 6. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 7. Maksvell Dzh.K. Izbrannyye sochineniya po teorii `elektromagnitnogo polya. – M.: Gostehizdat, 1954. – 687 s. 8. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. I-II, Clarendon Press, Oxford, 1873. -1011 p.

Поступила 29.08.2011

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния"

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47

Тел. (057) 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.

An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 12: classical electrodynamics.

A brief scientific essay on the history of classical electrodynamics development in the 18ththrough 20th centuries is given.

Key words – history, essay, classical electrodynamics.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ ЭКСПРЕСС КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

У статті розглядаються питання розрахунків пристрій неруйнівного експрес контролю механічних напруг. Отримано аналітичний вираз для розрахунків ЕРС, що наводиться у вимірювальній обмотці перетворювача. Розроблена система автоматичного контролю забезпечує лінійність вихідної напруги перетворювача залежно від значення механічної напруженості.

В статье рассматриваются вопросы расчета устройств неразрушающего экспресс контроля механических напряжений. Получено аналитическое выражение для расчета ЭРС, что наводится в измерительной обмотке преобразователя. Разработанная система автоматического контроля обеспечивает линейность выходного напряжения преобразователя в зависимости от значения механической напряженности.

Одной из актуальных задач при неразрушающем контроле, например радиотехнических, бортовых и пр., ферромагнитных конструкций является определение механических напряжений, возникновение которых обусловлено действием эксплуатационных и технологических факторов и часто влияет на успешное выполнение конечной задачи [1].

При контроле механических напряжений в ответственных узлах и деталях сложных систем, где число контролируемых точек выражается в десятках, сотнях и более, а контроль должен быть диагностическим и оперативным, необходимо использование специализированных или универсальных вычислительных машин.

В основу построения автоматической системы контроля (ACK) механических напряжений в m -точках любой конструкции может быть положена система, блок-схема которой приведена на рис. 1.

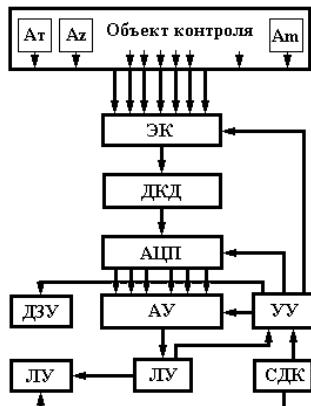


Рис. 1

Как видим, количество преобразователей D_1-D_m , встроенных в объект контроля (OK), равно количеству контролируемых точек. Функциональное назначение электронного коммутатора (ЭК) и аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) не требует пояснений. Каждый выходной сигнал АЦП имеет цифровой код, соответствующий значению контролируемого m -м преобразователем параметра. Сигналы с выхода АЦП поступают в арифметическое устройство (АУ), в котором происходит сравнение с верхним и нижним допустимыми значениями параметров. Информация о допустимых пределах хранится в долговременном запоминающем устройстве

(ДЗУ) компьютера. Устройство управления (УУ) служит для обеспечения синхронности работы ЭК, АЦП, АУ и ДЗУ. Результат сравнения поступает на вход логического устройства (ЛУ), Если контролируемый параметр находится в поле допуска, он записывается в ячейку оперативной памяти компьютера, а также может быть записан регистрирующим устройством (РУ). При выходе контролируемого параметра за пределы поля допуска, сигнал с ЛУ подается в устройство управления, которое конкретизирует номер контрольной точки измерения и значение отклонения механического напряжения от допустимого. При необходимости информации о параметре, вышедшем за поле допуска, с ЛУ подается в подсистему диагностического контроля (СДК), которая устанавливает причину отклонений.

Одними из основных элементов любой автоматизированной системы контроля являются чувствительные элементы-преобразователи, от чувствительности и надежности которых в первую очередь зависит эффективность работы ACK [2-8]. Из широкого класса преобразователей, которые могут быть использованы в ACK, следует отдавать предпочтение магнитоупругим, которые отличаются исключительной надежностью и мощным выходным сигналом. Например, по сравнению с тензометрическими, магнитоупругие преобразователи имеют чувствительность на порядок большую. Применение магнитоупругих преобразователей обеспечивает неразрушающее определение механических напряжений в напряженных элементах конструкций, а это позволяет применять ACK для более широких практических вопросов.

При использовании в ACK магнитоупругих преобразователей приходится считаться и с их недостатками. Как правило, преобразователи выполняются на основе П-образного накладного магнитопровода [6], что затрудняет выделение полезной информации из начального сигнала. Применение различного рода компенсационных схем для устранения начального сигнала ограничивает быстродействие и возможности ACK, так как требуются дополнительные регулировочные операции при установке ACK с объектом на объект.

В рассмотренном плане более эффективны преобразователи, выполненные по мостовой схеме, которые позволяют сразу получать полезную информацию без наложения начального сигнала и с минимальным влия-

нием колебаний окружающей температуры на сопротивление обмоток и соединительных проводов. Такой преобразователь выполнен из двух П-образных магнитопроводов, расположенных относительно друг друга под углом 90°. На магнитопроводе 1 расположена измерительная обмотка 2, подключенная к измерительному прибору, а на магнитопроводе 3 - намагничивающая обмотка 4, через которую пропускается намагничивающий ток определенной частоты [7]. Преобразователь при контроле механических напряжений устанавливается на исследуемую деталь 5 (рис. 2).

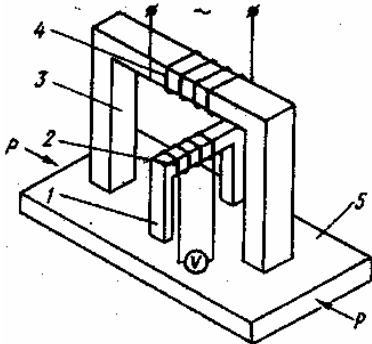


Рис. 2

При отсутствии механических напряжений в области контроля магнитное поле экспоненциально относительно полюсов из мерительного магнитопровода и в измерительной обмотке электродвижущая сила (ЭДС) не наводится.

Механические напряжения, возникающие при воздействии на материал усилия P , нарушают симметрию магнитного поля относительно измерительно-го магнитопровода, что приводит к ответвлению части потока через магнитопровод с измерительной обмоткой и в ней наводится ЭДС.

На рис. 3 приведена электрическая схема замещения магнитной цепи преобразователя, на которой приняты следующие обозначения: Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 – магнитные сопротивления участков материала между полюсами П-образных магнитопроводов; Z_u, Z_h – сопротивление магнитопровода с измерительной и намагничивающей обмотками; $R_{\delta u}, R_{\delta h}$ – сопротивления воздушных зазоров под полюсами намагничивающего и измерительного магнитопроводов; R_{my} – сопротивление полям утечки; Z_0 – магнитное сопротивление участка исследуемой детали между полюсами намагничивающего магнитопровода; F – намагничивающая сила; Z_∂ – магнитное сопротивление намагниченного участка при изотропных его свойствах; $Z_{\partial a}$ – магнитное сопротивление намагниченного участка с анизотропными свойствами.

При установке преобразователя на материал с анизотропными свойствами-

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z, \quad (1)$$

Как следует из схемы замещения (рис. 3), магнитный поток Φ , создаваемый намагничивающей силой F

$$\Phi = \frac{F(R_{my} + 2R_{\delta h} + Z_\partial)}{Z_h(R_{my} + 2R_{\delta h} + Z_\partial) + R_{my}(2R_{\delta h} + Z_\partial)}, \quad (2)$$

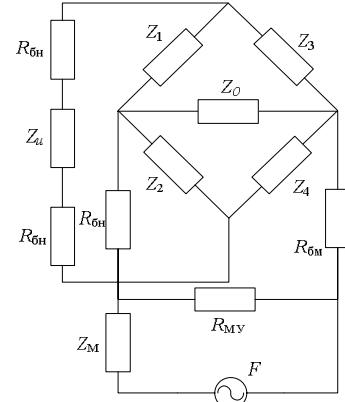


Рис. 3

Поскольку магнитодвижущая сила, возникающая между полюсами намагничивающего магнитопровода, $F_h = \Phi Z_0$ то, учитывая выражение (2), получаем

$$F_h = \frac{F Z_\partial (R_{my} + 2R_{\delta h} + Z_\partial)}{Z_h(R_{my} + 2R_{\delta h} + Z_\partial) + R_{my}(2R_{\delta h} + Z_\partial)}, \quad (3)$$

а магнитодвижущая сила между полюсами измерительного магнитопровода определится из уравнения

$$F_u = \frac{F_h}{Z_1 + Z_3} Z_1 - \frac{F_h}{Z_2 + Z_4} Z_4. \quad (4)$$

Проведя несложные преобразования и подставив в уравнение (4) соотношение (3), запишем

$$F_h = \frac{I w_h Z_\partial (R_{my} + 2R_{\delta h} + Z_\partial)}{Z_h(R_{my} + 2R_{\delta h} + Z_\partial) + R_{my}(2R_{\delta h} + Z_\partial)} \times \frac{Z_1 Z_2 - Z_3 Z_4}{(Z_1 + Z_3)(Z_2 + Z_4)}. \quad (5)$$

где I – значение намагничивающего тока, w_h – количество витков намагничивающей обмотки

Тогда магнитный поток, проходящий через измерительную обмотку

$$\Phi_u = \frac{F_u}{2R_{\delta u} + Z_u}. \quad (6)$$

Анализ электрической схемы замещения и соотношений (5), (6) показывает, что при изотропных свойствах исследуемого материала в случае, когда

$$Z_1 Z_2 - Z_3 Z_4 = 0, \quad (7)$$

поток, проходящий по измерительному магнитопроводу, будет равен нулю.

При возникновении анизотропии в материале (например, под действием механических напряжений сжатия или растяжения) магнитное сопротивление участков

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_2 = Z_c, \\ Z_3 &= Z_4 = Z_p. \end{aligned} \quad (8)$$

Как показано в работе [9], магнитное сопротивление изотропного материала под полюсами преобразователя

$$Z_\partial = \frac{4\pi}{\mu d(\ln d + \ln(d - 2l) - 2\ln(l - d))}. \quad (9)$$

где d – диаметр магнитопровода.

Тогда магнитное сопротивление одного из участков определится из уравнения

$$\frac{1}{Z_{\partial}} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_0}, \quad (10)$$

откуда

$$Z = \frac{Z_0 Z \partial}{Z_0 + Z \partial}. \quad (11)$$

Учитывая, что

$$Z_0 = \frac{l}{\mu_h S} = \frac{l}{\mu_h b \delta}. \quad (12)$$

где l – расстояние между центрами полюсов намагничающего магнитопровода, δ – глубина проникновения магнитного поля, b – ширина участка между полюсами намагничающего магнитопровода, и учитывая выражения (9) и (12), получаем

$$Z_{\partial} = \frac{4\pi l}{\mu \delta [(\ln d + \ln(d - 2l) - 2 \ln(l - d)) - 4\pi b]}. \quad (13)$$

При анизотропии исследуемого материала, вызванной механическими напряжениями, можно записать

$$Z_1 = Z_2 = Z \frac{\mu_h}{\mu_c}, \quad (14)$$

$$Z_3 = Z_4 = Z \frac{\mu_h}{\mu_p}, \quad (15)$$

где μ_h – начальная магнитная проницаемость исследуемого материала, μ_c , μ_p – магнитная проницаемость участков с сжимающими и растягивающими напряжениями соответственно.

Относительное изменение магнитной проницаемости материала, подвергающегося действию напряжений σ [10, 11]

$$\frac{\Delta \mu}{\mu \sigma} = \lambda_0 \mu_h \sigma, \quad (16)$$

где λ_0 – начальная магнитострикция исследуемого материала.

Поэтому магнитная проницаемость материала в направлении сжимающих и растягивающих напряжений

$$\begin{aligned} \mu_c &= \mu_h - \mu \sigma \lambda_0 \mu_h \sigma_c, \\ \mu_p &= \mu_h + \mu \sigma \lambda_0 \mu_h \sigma_p, \end{aligned} \quad (17)$$

где $\mu \sigma$ – магнитная проницаемость материала при напряжениях в нем σ ; σ_c , σ_p – напряжения сжатия и растяжения соответственно.

С учетом выражения (17) соотношения (14) и (15) принимают вид

$$Z_c = Z_1 = Z_2 = Z \frac{1}{1 - \lambda_0 \mu \sigma \sigma_c}, \quad (18)$$

$$Z_p = Z_3 = Z_4 = Z \frac{1}{1 + \lambda_0 \mu \sigma \sigma_p}. \quad (19)$$

Учитывая, что напряжения сжатия и растяжения направлены под углом 45° к оси намагничающего магнитопровода, а между собой взаимно-перпендикулярны, магнитное сопротивление детали под полюсами преобразователя определимся из уравнения

$$\frac{1}{Z_{\partial a}} = \frac{1}{Z_c + Z_p} + \frac{1}{Z_0}. \quad (20)$$

Учитывая физическую глубину проникновения магнитного поля, получаем

$$Z_{\partial a} = \frac{l \mu_h K Z \sqrt{\omega \mu_a \gamma}}{2l \sqrt{\omega \mu_a \gamma} + \sqrt{2} Z \mu_h^2 b K}, \quad (21)$$

где

$$K = \frac{2 + \mu \sigma \lambda_0 (\sigma_p - \sigma_c)}{\mu_h (1 + \mu \sigma \lambda_0 \sigma_p) (1 - \mu \sigma \lambda_0 \sigma_c)}, \quad (22)$$

ω – угловая частота, γ – электропроводность испытуемого материала.

В частном случае, когда $\sigma_c = \sigma_p = \sigma$

$$K = \frac{2}{\mu_h (1 - (\mu \sigma \lambda_0 \sigma)^2)}, \quad (23)$$

а величина магнитного потока, проходящего через магнитопровод с измерительной обмоткой, определяется выражением

$$\Phi_u = \frac{2 \lambda_a \mu_h \sigma (R_{my} + R_{\delta H} + Z_{\partial a})}{(Z_h (R_{my} + 2R_{\delta H} + Z_{\partial a}) + R_{my} (2R_{\delta H} + Z_{\partial a}))} \times \frac{Iw_h Z_{\partial a}}{Z_u + Z_{\delta H}}. \quad (24)$$

При отсутствии зазоров под полюсами преобразователя пренебрегаем полями рассеяния

$$\Phi_u = Iw_h Z_{\partial a} \frac{Z \lambda_a \mu_h \sigma}{Z_{my} Z_h}. \quad (25)$$

Приняв во внимание соотношения (21–25), запишем уравнение, определяющее зависимость магнитного потока, проходящего через измерительную обмотку, от значения механических напряжений

$$\Phi_u = \frac{K_1 \sigma}{K_2 - K_3 \sigma^2}, \quad (26)$$

где $K_1 = 4Iw_h \lambda_a \mu_h^2 l Z \sqrt{\omega \mu_a \gamma}$, $K_2 = 2l \mu_h \sqrt{\omega \mu_a \gamma} + 2\sqrt{2} \mu_h^2 \delta$, $K_3 = 2l \mu_h \sqrt{\omega \mu_a \gamma} \mu \sigma \lambda_a^2$.

Для ЭДС, наводимой в измерительной обмотке преобразователя, получим

$$E = 4,44 f w_h \frac{K_1 \sigma}{K_2 - K_3 \sigma^2}. \quad (27)$$

На рис. 4 приведен график зависимости выходного сигнала, снимаемого с измерительной обмотки преобразователя, от механических напряжений при растяжении испытуемого образца на разрывной машине после пятидесяти предварительных циклов нагружения с последующим разгрузением (для уменьшения магнитоупругого гистерезиса). Из графика следует, что значение выходного сигнала практически линейно зависит от значения механических напряжений в испытуемом материале в пределах упругой деформации.

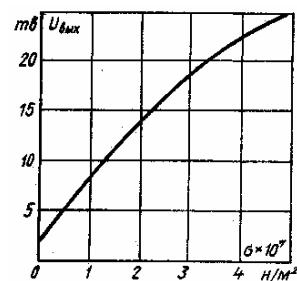


Рис. 4

Согласование сигнала электромагнитного преобразователя с блоком аналого-цифрового преобразователя (АЦП) может осуществляться как на переменном, так и на постоянном токе. Схемы согласования на переменном токе проще, однако согласование при этом имеет ряд существенных недостатков [12, 13]. Фазовые сдвиги напряжений требуют установки в выходные цепи каждого преобразователя фазосдвигающих устройств и индивидуальной настройки их при каждом изменении точек контроля механических напряжений в конструкциях, а высшие гармоники в выходном сигнале усложняют работу АЦП.

Большинство промышленных аналого-цифровых преобразователей предназначены для преобразования знакопостоянного аналогового напряжения, поэтому на входе установлен диодный кольцевой демодулятор (рис. 5).

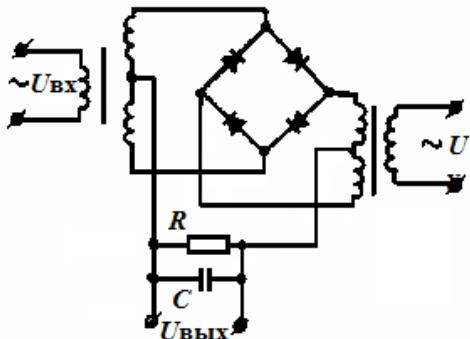


Рис. 5

Управляющий сигнал U_y переключает диоды. При $U_y \gg U_{ax}$ выходной сигнал линейно зависит от выпрямляемого напряжения.

ВЫВОДЫ

Разработанная система автоматического контроля механических напряжений может быть успешно использована для контроля статических и динамических напряжений в диапазоне $0...4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ при практической линейной зависимости выходного сигнала преобразователя от значения механической напряженности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сердаков А.С. Автоматический контроль и техническая диагностика. – К: Техника, 1981. – 242 с.
- Мехонцев Ю.Я. Измерение напряжений по магнитной анизотропии. – М: ГОСИНТИ, 1964.
- Наумов К.С. Расчет подковообразного датчика на ферромагнитной основе // Электромеханика. – 1969. – № 2. – С. 20-23.
- Безотосний В.Ф. К вопросу повышения точности расчета выходных характеристик базового многофункционального магнитоупругого датчика / В.Ф. Безотосний, В.В. Козлов, О.В. Набокова // Вісник НТУ "ХПІ". – 2010. – №48. – С. 56-59.
- Безотосний В.Ф. Учет энергетических факторов при расчете намагниченности ферромагнитных материалов / В.Ф. Безотосний, Э.В. Власенко // Электротехника и электроэнергетика. – 2004. – № 1. – С.13-17.
- Чаплыгин В.И. Электромагнитный преобразователь усилий / В.И. Чаплыгин, В.Ф. Безотосний // Изв. вузов. Электромеханика. – 1977. – № 10. – С. 1159-1163.
- Чаплыгин В.И. Электромагнитный преобразователь с частотным выходом для контроля электромагнитных

- свойств ферромагнитных материалов / В.И. Чаплыгин, В.Ф. Безотосний // Дефектоскопия. – 1976. – № 5. – С. 91-94.
- Безотосний В.Ф. Деякі актуальні напрямки неруйнуочного контролю властивостей матеріалів електромагнітними методами / В.Ф. Безотосний, Е.В. Власенко, В.В. Козлов, И.О. Афанас'єва, О.В. Набокова // Електротехніка та електромеханіка. – 2008. – № 6. – С. 23-26.
 - Шумиловский Н.Н., Ярмольчук В.П. Метод вихревых токов. – М.: Энергия, 1966. – 161 с.
 - Дорофеев А.Л. Электроиндуктивная (индукционная) дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1967. – 231 с.
 - Дорофеев А.Л. Неразрушающие испытания методом вихревых токов. – М.: Оборонгиз, 1961. – 156 с.
 - Остапенко В.Д., Гайдамакин В.С., Чихаев О.П. Исследование возможности контроля качества шлифования закаленных сталей токовихревым методом. – М.: Энергия, 1972. – 173 с.
 - Неразрушающие испытания. Справочник. / Под ред. Мак-Мастера. – М.: Энергия, 1965. – 201 с.

Bibliography (transliterated):

- Serdakov A.S. Avtomaticheskij kontrol' i tchnicheskaya diagnostika. - K: Tehnika, 1981. - 242 s.
- Mehoncav Yu.Ya. Izmerenie napryazhenij po magnitnoj anizotropii. - M: GOSINTI, 1964. 3. Naumov K.S. Raschet podkovoobraznogo datchika na ferromagnitnoj osnovje // "Elektromehanika". - 1969. - № 2. - S. 20-23.
- Bezotosnyj V.F. K voprosu povysheniya tochnosti rascheta vyhodnyh harakteristik bazovogo mnogofunkcional'nogo magnitouprugogo datchika / V.F. Bezotosnyj, V.V. Kozlov, O.V. Nabokova // Visnik NTU "HPI". - 2010. - №48. - S. 56-59.
- Bezotosnyj V.F. Uchet `energeticheskikh faktorov pri raschete namagnichennosti ferromagnitnyh materialov / V.F. Bezotosnyj, 'E.V. Vlasenko // "Elektrotehnika i `elektro`energetika". - 2004. - № 1. - S.13-17.
- Chaplygin V.I. 'Elektromagnitnyj preobrazovatel' usilij / V.I. Chaplygin, V.F. Bezotosnyj // Izv. vuzov. 'Elektromehanika'. - 1977. - № 10. - S. 1159-1163.
- Chaplygin V.I. 'Elektromagnitnyj preobrazovatel' s chastotnym vyhodom dlya kontrolya `elektromagnitnyh svojstv ferromagnitnyh materialov / V.I. Chaplygin, V.F. Bezotosnyj // Defektoskopija. - 1976. - № 5. - S. 91-94.
- Bezotosnyj V.F. Deyaki aktual'ni napryamki nerujnuyuchogo kontrolyu vlastivostej materialiv elektromagnitnymi metodami / V.F. Bezotosnyj, E.V. Vlasenko, V.V. Kozlov, I.O. Afanas'eva, O.V. Nabokova // Elektrotehnika ta elektromehanika. - 2008. - № 6. - S. 23-26.
- Shumilovskij N.N., Yarmol'chuk V.P. Metod vihrevykh tokov. - M.: 'Energiya', 1966. - 161 s.
- Dorochev A.L. 'Elektroinduktivnaya (indukcionnaya) defektoskopija. - M.: Mashinostroenie, 1967. - 231 s.
- Dorochev A.L. Nerazrushayuschie ispytaniya metodom vihrevykh tokov. - M.: Oborongiz, 1961. - 156 s.
- Ostapenko V.D., Gajdamakin B.C., Chihaev O.P. Issledovanie vozmozhnosti kontrolya kachestva shlifovaniya zakalennych stalej tokovihrevym metodom. - M.: 'Energiya', 1972. - 173 s.
- Nerazrushayuschie ispytaniya. Spravochnik. / Pod red. Mak-Mastera. - M.: 'Energiya', 1965. - 201 s.

Поступила 19.10.2012

Безотосний Владимир Федорович, к.т.н., доц.,
Козлов Владимир Владимирович, к.т.н., доц.,
Набокова Ольга Владимировна

Запорізький національний технічний університет
кафедра "Теоретична та загальна електротехніка"
69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
тел. (061) 2281612

Bezotosnyi V.F., Kozlov V.V., Nabokova O.V.

Rapid nondestructive mechanical stress control.

The paper considers problems of nondestructive mechanical stress control device design. An analytical expression for calculation of EMF induced in the measuring winding of a converter is obtained. The automatic control system developed linearizes the converter output voltage versus mechanical intensity.

Key words – automatic control system, EMF calculation, converter output voltage linearization, nondestructive mechanical stress control.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРА З БЕЗКОНТАКТНИМ КАСКАДНИМ ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНІМ ЗБУДЖУВАЧЕМ ЗА СХЕМОЮ В ОДНУ ЗІРКУ ПІД ЧАС РОБОТИ НА АКТИВНО-ІНДУКТИВНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

Методом математичного експерименту виконано дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в автономній системі електрооживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазним модульованим збуджувачем. Проведено аналіз процесів на предмет роботопридатності системи живлення під час її роботи на активно-індуктивне навантаження. Встановлено закономірності перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів залежно від величини навантаження та схеми модулятора.

Методом математического эксперимента выполнено исследование электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих в автономной системе электропитания на базе асинхронизированного генератора с трехфазным модулированным возбудителем. Произведен анализ процессов на предмет работоспособности системы питания при ее работе на активно-индуктивную загрузку. Установлено закономерности протекания электромагнитных и электромеханических процессов в зависимости от величины нагрузки и схемы модулятора.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Стабілізування частоти напруги в автономних системах електрооживлення (АСЕЖ), для яких характерна змінна швидкість обертання ротора генератора, продовжує залишатися актуальною і важливою науково-практичною проблемою.

На сьогодні наука і практика в області електромеханіки та електроенергетики пропонує низку ефективних способів стабілізування частоти напруги. В цьому контексті один із перспективних варіантів створення АСЕЖ полягає в їх побудові на базі асинхронізованих генераторів (АСГ) з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем (БКМЗ) [6]. Низка проведених досліджень показують, що такі системи не лише забезпечують практично ідеальнє стабілізування частоти напруги при змінній швидкості обертання ротора генератора, але ще й відрізняються високим рівнем надійності бо належать до безконтактних.

Запропонований в [6] метод стабілізування частоти напруги ґрунтуються на принципі модуляції напруги, що дає змогу в обмотці ротора генератора отримати струм частоти ковзання, а це, своєю чергою, забезпечує постійну швидкість обертання магнітного поля стосовно обмотки статора генератора і, як наслідок, стабільну частоту напруги генератора.

Електромагнітні і електромеханічні процеси, які відбуваються в таких системах електрооживлення належать до особливо складних з погляду характеру визначальних координат та їх функційних взаємозв'язків. Це зумовлено доволі складною будовою цих систем електрооживлення. Адже, до їх складу окрім самого генератора входять функційно пов'язані між собою дві асинхронні машини модулятора, тиристорний комутатор циклопонверторного типу, а також застосовуються системи автоматичного керування (САК) відповідними координатами та система керування (СК) вентильним комутатором. Складність будови таких систем електрооживлення в поєднанні зі складністю характеру перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в цих системах, однозначно вказує на те, що безпосередня розробка систем живлення такого типу має ґрунтуватися на всебічних ретельних теоретичних та практичних наукових дослідженнях як стосовно схемних рішень силового електричного кола, так і стосовно закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів з врахуванням природи споживачів електроенергії. Результати одного з таких досліджень, яке стосуються впливу параметрів навантаження і схеми модулятора на ход процесів, наведені в [5].

Дослідження і схемних рішень на функціонування автономних систем електрооживлення на базі АСГ з БКМЗ під час їх роботи на активно-індуктивне навантаження і становлять предмет цієї статті.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Загально визнано, що математичне моделювання слугує потужним і ефективним засобом дослідження процесів, які відбуваються в електротехнічних системах. Автор протягом останніх років виконав значний обсяг робіт, пов'язаний з розробкою математичних моделей і відповідних програмних комплексів автономних систем електрооживлення на базі генераторів з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем, а також з проведеним дослідженням за допомогою розроблених математичних моделей. Так, у [1, 2] розроблено математичні моделі автономної системи електрооживлення на базі асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним та трифазно-трифазним БКМЗ відповідно. Характерною особливістю цих математичних моделей є те, що в них не передбачено наявності рушія ротора генератора, що істотно обмежує їх можливості в плані дослідження перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів системи. Безумовно, що такі обмеження становили істотний недолік математичних моделей. Тому, на наступному етапі були розроблені математичні моделі, які дають змогу моделювати динамічні електромагнітні та електромеханічні процеси з врахуванням наявності в моделі рушія ротора генератора [3, 4].

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

З теорії систем генерування на базі асинхронізованого генератора з БКМЗ [6] відомо, що ці системи можуть формуватися за низкою сімейств схем силового електричного кола, які однозначно мають принциповий вплив на характер перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів. Очевидним також є те, що на перебіг процесів впливає вид навантаження (тобто тип споживачів) та їх режими роботи. Тому завдання дослідження таких систем загалом полягає у вивчені закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів для кожної з можливих схем силового електричного кола (модулятора, генератора і комутатора), а також для кожного з видів споживачів електроенергії їх параметрів та режимів роботи. В цьому контексті в [5] проведено дослідження функціонування автономної системи електрооживлення на активно-індуктивне навантаження.

© Василів К.М.

лення на базі асинхронізованого генератора з без контактним каскадним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фазних гілок машин модулятора під час роботи на активно-індуктивне навантаження. Там акцентувалася увага на спільному з'єднанні фаз модулятора. Для повноти дослідження такої системи за схемою генератора в одну зірку необхідно виконати аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в системі електрооживлення з врахуванням ще однієї можливої схеми модулятора – з комбінованим з'єднанням фазних гілок машин модулятора.

Отже, тут для порівняльного аналізу перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ за схемою генератора в одну зірку акцентуватимемо увагу на двох видах схем модулятора: зі спільним з'єднанням, що було предметом аналізу в [5] та комбінованим з'єднанням, що становить предмет аналізу цієї статті.

Таким чином, на підставі викладеного вище, констатуємо, що задача дослідження в цій статті полягає в аналізі електромагнітних і електромеханічних процесів АСЕЖ на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ з комбінованим з'єднанням фаз модулятора за схемою генератора в одну зірку та вивчені на його підставі загалом функціонання цих систем живлення для всіх (двох можливих) схем модулятора під час роботи генератора на активно-індуктивне навантаження.

РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ

Отже, враховуючи те, що об'єктом порівняльного аналізу процесів системи електрооживлення на базі асинхронізованого генератора з трифазним безконтактним каскадним модульованим збуджувачем є АСЕЖ за схемами з комбінованим та спільним з'єднанням фаз модулятора, схема силового електричного кола піддослідної системи електрооживлення має вигляд, зображеній на рис. 1. З цього рисунку видно, що структурними елементами схеми слугують: дві асинхронні машини АМ1 та АМ2; два джерела живлення цих машин Е1 та Е2 відповідно; безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ); генератор АГ, яким слугує асинхронна машина, фази обмотки ротора якої з'єднані в зірку. В схемі передбачено два можливі варіанти з'єднання фазних гілок машин модулятора: спільне, коли ключ K_0 замкнений і комбіноване, коли ключ K_0 розімкнений. До системи живлення також входять три споживачі (активно-індуктивні навантаження): Н1, Н2, Н3. Ключі K_1 , K_2 , K_3 призначенні для вимикання та відмикання цих споживачів.

Решта позначень на схемі рис. 1 мають такий зміст. Літерами φ , i , E позначені: потенціали, струми та електрорушійні сили. Літерами F, G, H в нижніх індексах відповідно позначено належність координат до модулятора, генератора, та активно-індуктивного навантаження. Літерами S, R в нижніх індексах позначено належність відповідних величин до статора і ротора електричних машин. Цифрами в нижніх індексах позначено номери електричних гілок у межах кожного із структурних елементів, а цифрою 0 в нижньому індексі – вузли з нульовим потенціалом. При цьому одним штрихом у верхньому індексі позначено потенціали φ_0 , φ_{20} , φ_{21} , які утворюються, коли ключ K_0 розімкнений (комбіноване з'єднання), а двома штрихами – нульовий потенціал φ_0 , який утвориться, коли ключ K_0 замкнений (спільне з'єднання). Цифри в круглих дужках (1) і т. д. у верхньому індексі позначено належність відповідних величин до АМ1, АМ2 та джерел живлення модулятора Е1 і Е2.

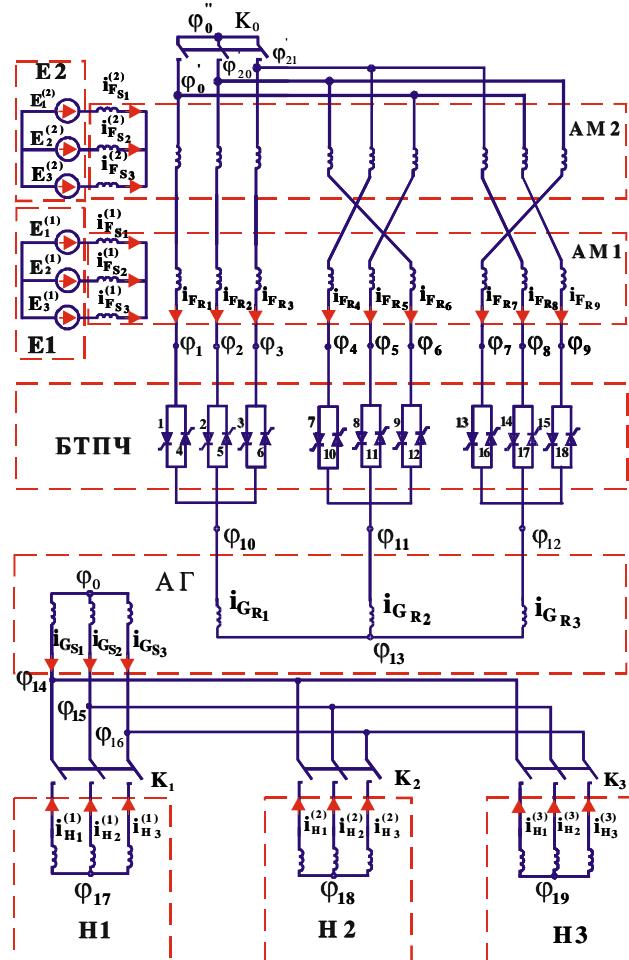


Рис. 1. Схема силового електричного кола АСЕЖ

Зі схеми силового електричного кола системи живлення рис. 1 видно, що кожна з фаз обмоток роторів АМ1 та АМ2 розділена на три гілки, які з боку виходу з АМ2 і входу до АМ1 з'єднані між собою послідовно з перехрещенням фаз. Саме таке сполучення АМ1 та АМ2 утворює функційний структурний елемент, який забезпечує модуляцію напруги і тому називається модулятором [6].

Суть дослідження полягає в розрахунку електромагнітних та електромеханічних процесів, результатом якого є отримання розрахункових функціональних залежностей миттєвих значень всіх визначальних координат: струмів, потенціалів та напруг, а також швидкості обертання ротора генератора та машин модулятора і їх електромагнітних моментів.

Дослідження автономній системі електрооживлення проведено для асинхронізованого генератора потужністю 100 кВт. Моделювання процесів виконано для режиму, в якому задане значення ковзання ротора генератора є постійним і таким, що відповідає синхронній швидкості, тобто дорівнює нулю. На початковій стадії робочого циклу АСЕЖ вмикається рушій та виконується розгин ротора генератора. При досягненні швидкості обертання ротора близької до синхронної вмикається напруга живлення машин модулятора, тобто вмикається збудження. На наступній стадії робочого циклу системи виконується почергове вимикання трьох споживачів H_1 , H_2 , H_3 , а на останньому етапі виконується почергове відмикання в зворотній послідовності раніше ввімкнених споживачів: H_3 , H_2 , H_1 . Протягом цілого робочого циклу функціонують системи автоматичного керування

для стабілізування швидкості обертання ротора та амплітуди фазної напруги АСГ.

З метою вивчення функціонування системи живлення загалом і стійкості роботи комутатора, зокрема, під час її роботи на активно-індуктивне навантаження, проведемо розрахунки електромагнітних процесів для декількох різних за величиною значень активного опору та індуктивності навантаження, а також для декількох різних коефіцієнтів потужності $R-L$ навантажень. Теоретичні передбачення та низка попередніх досліджень (зокрема [5]) показують, що ці параметри мають істотний вплив на стійкість роботи комутатора, що є визначальним для функціонування такої системи живлення принципово. Для коректності порівняння функціонування системи електророживлення з різними схемами модулятора під час її роботи на активно-індуктивне навантаження тут промоделюємо електромагнітні і електромеханічні процеси для ідентичних значень параметрів $R-L$ навантаження як і в [5]. Про якість електроенергії за критерієм стабільності амплітуди напруги і відповідно про роботопридатність систем живлення цього типу можна робити висновок на підставі аналізу характеру розрахункових залежностей таких інтегральних координат як модулі зображення векторів (амплітуд) фазних напруг і струмів статора та струмів фаз ротора генератора $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_\mu^v$.

Отже, розрахуємо та проаналізуємо електромагнітні процеси, які відбуваються в автономній системі електророживлення за схемою генератора в одну зірку і комбінованим з'єднанням фаз модулятора. На рис. 2 зображені розрахункові залежності зазначеніх вище координат $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_\mu^v$, отриманих для роботи АСЕЖ на три активно-індуктивні навантаження з однаковими параметрами:

$$R_H^{(1)} = R_H^{(2)} = R_H^{(3)} = 10 \text{ Ом}, \quad L_H^{(1)} = L_H^{(2)} = L_H^{(3)} = 0,02387 \text{ Гн.}$$

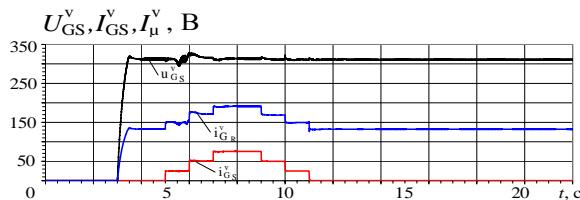


Рис. 2. $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_\mu^v$ – модулі зображення векторів фазних напруг і струмів статора та фазних струмів ротора генератора

Коефіцієнт потужності для таких співвідношень активного опору і індуктивності навантажень становить 0,8 ($\cos \phi=0,8$). Характер кривих цих координат відображає повний робочий цикл АСЕЖ за окремими його етапами. На першому етапі (за час від $t=0$ до $t=3$ с) рушій розкручує ротор генератора до синхронної швидкості. В момент часу $t=3$ с вмикається збудження. Тому на наступному відрізку спостерігається поява і зростання струму збудження (струму в обмотках ротора генератора) і, як наслідок, напруги статора генератора. Генератор працює в режимі неробочого ходу в діапазоні від $t=3$ до $t=5$ с. Починаючи з моменту часу $t=5$ с, щосекунди вмикаються споживачі в послідовності: Н1, Н2, Н3. На проміжку часу від $t=7$ до $t=9$ с генератор працює на всі три споживачі. А, починаючи з $t=9$ с, споживачі відмикаються в зворотній до увімкнення послідовності: Н3, Н2, Н1.

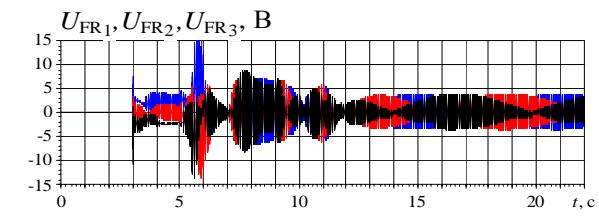
З форми кривої модуля зображення вектора фазної напруги статора генератора видно, що амплі-

туда напруги є стабільною, а в області переходних процесів, спричинених увімкненням та відмиканням споживачів, перебуває в допустимих стандартами межах відхилення від заданого значення.

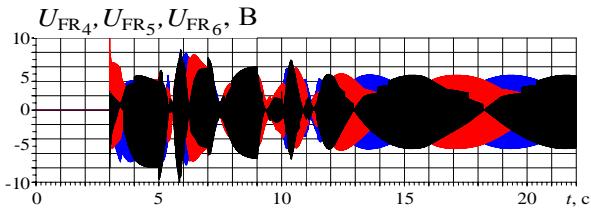
Вирішальну роль у забезпеченії необхідного і очікуваного характеру цих координат відіграє стійкість роботи комутатора. А це залежить від багатьох чинників, серед яких параметри машин модулятора і генератора, алгоритм і функціонування системи керування комутатором та системи автоматичного керування стабілізування визначених координат (тут амплітуди напруги генератора), а також параметри та режими роботи споживачів. З цього рисунку також видно, що система автоматичного керування виконує свою функцію стабілізування амплітуди напруги статора генератора, а інші координати (струми та напруги) відображають поведінку системи в межах робочого циклу (неробочого ходу, почергового вмикання споживачів, роботи в режимі повного навантаження та почергового відмикання споживачів).

Важливу роль у функціонуванні системи збудження і АСЕЖ загалом відіграє перебіг електромагнітних процесів у модуляторі. Тому перейдемо до аналізу напруг модулятора.

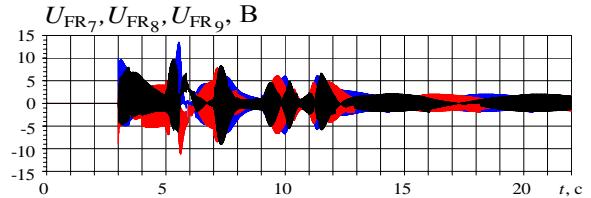
На рис. 3 зображені розрахункові залежності від часу миттєвих значень спадів напруг трьох трифазних груп фазних гілок роторів машин модулятора. Кожен з трьох рисунків За-в ілюструє миттєві значення спадів трифазних електрических напруг на послідовно з'єднаних фазних гілках роторів машин модулятора: рис. 3,а – напруги $u_{FR_1}, u_{FR_2}, u_{FR_3}$; рис. 3,б – напруги $u_{FR_4}, u_{FR_5}, u_{FR_6}$; рис. 3,в – напруги $u_{FR_7}, u_{FR_8}, u_{FR_9}$.



а – $u_{FR_1}, u_{FR_2}, u_{FR_3}$ – миттєві напруги I, II, III фазних гілок роторів машин модулятора



б – $u_{FR_4}, u_{FR_5}, u_{FR_6}$ – миттєві напруги IV, V, VI фазних гілок роторів машин модулятора



в – $u_{FR_7}, u_{FR_8}, u_{FR_9}$ – миттєві напруги VII, VIII, IX фазних гілок роторів машин модулятора

Рис. 3. Розрахункові залежності миттєвих значень напруг фазних гілок роторів машин модулятора

Криві на рис. 3 виразно відображають фізику процесів, внаслідок яких отримано електричні напруги модульованої форми частоти ковзання. Як бачимо з рисунків 3, на проміжку часу, де ковзання дорівнює нулю ($S=0$), спостерігаємо напруги без модуляції частотою заповнення $f_3=150$ Гц. Оскільки фазні напруги зсунуті між собою на 120° , а розташовані фазні гілки роторів АМ1 та АМ2 для другої та третьої фазних груп сполучені між собою перехресно зі зсувом на 120° (див. схему рис.1), то за частотою модуляції кожна з трьох трифазних систем напруг та струмів також зсунуті між собою на кут 120° , що виразно ілюструє рис. 3. Амплітуди напруг змінюються залежно від зміни електрорушійних сил джерел живлення, а ця, своєю чергою, таким чином, щоб підтримувати потрібне значення струму збудження.

З рис. 3 видно, що криві напруг мають модульовану форму з частотою ковзання і частотою заповнення, значення якої залежить від швидкості обертання ротора генератора і співвідношення кількості пар полюсів машин модулятора [6].

З рис. 3 видно, що модулятор, згідно з теоретичним передбаченнями виконує свою функцію – утворення напруг модульованої форми, потрібних для формування циклоконвертором трифазної системи струмів частотою ковзання.

Структурні елементи АСЕЖ перебувають у стані функційного взаємного зв'язку. Тому будь-які збурення в одному з них неминуче відповідно впливають на процеси в усіх інших. У випадку цього режиму джерелом таких збурень слугує вимкнення та відмикання споживачів, що призводить до зміни швидкості обертання ротора генератора. Очевидно, що напруги та струми фазних гілок роторів машин модулятора також повинні реагувати на ці збурення. З візуального аналізу форми кривих напруг, зображеніх на рис. 3 виразно видно, що криві цих напруг зазнають істотного реформування яке, спричинено переходними процесами, які, своєю чергою, виникли внаслідок вимкнення та відімкнення навантаження.

Визначальний вплив на перебіг процесів у таких системах та їх функціонування загалом мають процеси в обмотці збудження генератора. Тому інформація про характер електричних струмів та напруг у обмотці ротора генератора має принципово важливе значення. Проаналізуємо розрахункові залежності фазних напруг ротора генератора, які зображені на рис. 4. З цього рисунку видно, що характер фазних напруг ротора генератора відображає закономірності електромагнітних процесів, які відбуваються в модуляторі. В наслідок роботи комутатора в обмотці ротора генератора формується трифазна система напруг частоти ковзання. На дільницях постійної швидкості обертання ротора генератора частота напруг дорівнює нулю, тобто маємо вирямлену постійну напругу. Зміна амплітуди напруги на дільницях, де вона змінна і значення напруги на дільницях, де вона постійна, визначається зміною амплітуд модульованих напруг на виході модулятора (див. рис. 3).

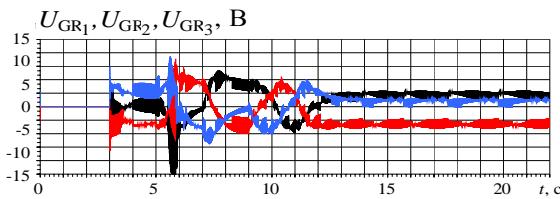


Рис. 4. $u_{GR_1}, u_{GR_2}, u_{GR_3}$ – напруги ротора АГ

Фазні напруги ротора генератора частоти ковзання дають підставу на сподівання отримати фазні струми ротора генератора аналогічної форми. На рис. 5 зображені розрахункові залежності від часу фазних струмів ротора генератора.

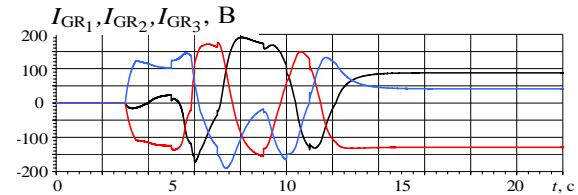


Рис. 5. $i_{GR_1}, i_{GR_2}, i_{GR_3}$ – струми ротора АГ

Характер кривих цих струмів вказує на те, що безконтактна система збудження на базі каскадного модулятора дає змогу отримати струм збудження генератора частоти ковзання, що, своєю чергою, забезпечує постійну швидкість обертання магнітного поля генератора стосовно обмотки статора, а значить і постійну частоту напруги генератора не залежно від частоти обертання ротора генератора. Водночас форма кривих на цьому рисунку виразно вказує на те, що модульований перетворювач частоти дає змогу отримати високоякісні струми збудження, що слугує необхідною передумовою для отримання високоякісної напруги генератора за критерієм гармонічного спектра.

З наведених вище результатів моделювання (рис. 2-5) видно, що для вибраних параметрів навантаження АСЕЖ за схемою генератора з комбінованим з'єднанням фазних гілок машин модулятора працює стабільно. Але при збільшенні навантаження та коефіцієнта потужності (як і в [5]) стійкість роботи системи порушується. Результати дослідження показують, що автономна система електро живлення за схемою генератора з комбінованим з'єднанням фазних гілок машин модулятора працює стабільно для більших навантажень порівняно зі схемою зі спільним з'єднанням. Це означає, що така схема модулятора є більш досконалою. Аргументом для такого важливого висновку слугує порівняння характеру основних інтегральних координат $u_{GS}^v, i_{GS}^v, i_\mu^v$, зображеніх на рис. 2 (для комбінованого з'єднання) та характеру цих же координат при ідентичних параметрах навантаження для схеми зі спільним з'єднанням, отриманих в [5] і зображеніх на рис. 6.

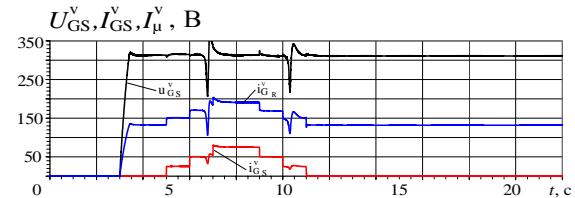


Рис. 6. $U_{GS}^v, I_{GS}^v, I_\mu^v$ – модулі зображення векторів фазних напруг та фазних струмів ротора генератора для схеми модулятора зі спільним з'єднанням фазних гілок ротора машин модулятора для навантаження:

$$R_H=10 \text{ Ом}, L_H=0,02387 \text{ Гн}$$

З рис. 6 видно, що схема модулятора зі спільним з'єднанням фазних гілок машин модулятора не забезпечує стійкості роботи системи електро живлення для таких великих навантажень, як схема з комбінованим з'єднанням. Аналогічні висновки правомірні стосовно коефіцієнта навантаження. Тут також схема модулятор

зі спільним з'єднанням фазних гілок машин модулятора забезпечує стійкість роботи системи для більших значень коефіцієнта потужності (навіть близьких до 1).

Отримані результати дослідження АСЕЖ за схемою генератора в одну зірку і спільним та комбінованим з'єднанням фазних гілок ротора машин модулятора під час її роботи на активно-індуктивне навантаження дають підставу узагальнити результати дослідження про закономірності перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів в цій системі живлення залежно від параметрів активно-індуктивного навантаження та схем з'єднання фазних гілок машин модулятора. Ці узагальнення сформулюємо у висновках.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ на базі АСГ з трифазно-трифазним БКМЗ за схемою генератора в одну зірку і комбінованим з'єднанням фазних гілок роторних обмоток машин модулятора під час її роботи на активно-індуктивне навантаження принципово є роботопридатною.

2. На стійкість роботи комутатора і системи живлення загалом істотний вплив мають параметри активно-індуктивного навантаження. Збільшення навантаження з боку споживачів понад критичне значення порушує стійкість роботи комутатора і систем електро живлення загалом.

3. Робота АСЕЖ є стійкою і стабільною для практично необмеженого діапазону коефіцієнта потужності активно-індуктивного навантаження на відміну від аналогичної системи електро живлення зі спільним з'єднанням фазних гілок машин модулятора.

4. Порівняльний аналіз характеру перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ на базі АСГ з БКМЗ за схемами модулятора зі спільним і комбінованим з'єднанням фазних гілок машин модулятора показує, що схема модулятора з комбінованим з'єднанням забезпечує вищий рівень стабільності роботи комутатора і системи електро живлення загалом, а ніж схема модулятора зі спільним з'єднанням фазних гілок машин модулятора.

5. Для практичного впровадження системи генерування за схемою генератора в одну зірку рекомендується система з трифазно-трифазним модулятором за схемою комбінованого з'єднання фазних гілок машин модулятора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Василів К.М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з двофазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К.М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 2. – С. 54-60.
2. Василів К. М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем / К.М. Василів // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 50-55.
3. Василів К. М. Узагальнена математична модель автономної електроенергетичної системи на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем за нульовою схемою / К.М. Василів // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 15-20.

4. Василів К. М. Методи і моделі аналізу процесів автоно- мих систем електро живлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем: дис. доктора техн. наук: 05.09.03 / Василів Карл Миколайович. – К., 2010. – 398 с.

5. Василів К. М. Аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фаз модулятора під час роботи на активно-індуктивне навантаження / К.М. Василів // Вісник НТУ "ХПІ". – 2012. – № 49. – С. 27-37.

6. Галиновский А. М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты / Галиновский А.М. // Труды I Международной (III Все-российской) конференции по Электромеханотронике. – Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. – 1997. – С. 182-192.

Bibliography (transliterated): 1. Vasiliv K.M. Matematichna model' dinamichnih procesiv avtonomnoi elektroenergetichnoi sistemi na bazi bezkontaktnogo asinhronizovanogo generatora z dvofazno-trifaznim kaskadnym modul'ovanim zbudzhuvachem / K.M. Vasiliv // Tehnichna elektrodinamika. - 2005. - № 2. - S. 54-60. 2. Vasiliv K. M. Matematichna model' dinamichnih procesiv avtonomnoi elektroenergetichnoi sistemi na bazi bezkontaktnogo asinhronizovanogo generatora z trifazno-trifaznim kaskadnym modul'ovanim zbudzhuvachem / K.M. Vasiliv // Tehnichna elektrodinamika. - 2004. - № 5. - S. 50-55. 3. Vasiliv K. M. Uzagal'nena matematichna model' avtonomnoi elektroenergetichnoi sistemi na bazi asinhronizovanogo generatora z bezkontaktnim kaskadnim trifazno-trifaznim modul'ovanim zbudzhuvachem za nul'ovoju shemoyu / K.M. Vasiliv // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 2. - S. 15-20. 4. Vasiliv K. M. Metodi i modeli analizi procesiv avtonomnih sistem elektrozhivleniya na bazi asinhronizovanogo generatora z bezkontaktnim kaskadnim modul'ovanim zbudzhuvachem: dis. doktora tehn. nauk: 05.09.03 / Vasiliv Karl Mikolajovich. - K., 2010. - 398 s. 5. Vasiliv K. M. Analiz procesiv avtonomnogo generatora z bezkontaktnim kaskadnim trifaznim modul'ovanim zbudzhuvachem za shemoyu v odnu zirku i spil'nim z'ednannym faz modulyatora pid chas roboti na aktivno-induktivne navantazhennya / K.M. Vasiliv // Visnik NTU "HPI". - 2012. - № 49. - S. 27-37.

6. Galinovskij A. M. Beskontaktnyj asinhronizirovannyj generator s modulirovannym preobrazovatelem chastoty / Galinovskij A.M. // Trudy I Mezhdunarodnoj (III Vserossijskoj) konferencii po 'Elektromehanotronike'. - Sankt-Peterburgskij gos. 'elektrotehn. un-t. - 1997. - S. 182-192.

Надійшла 11.10.2012

*Vasiliv Karl Mikolajovich, d.m.n.
Львівський національний аграрний університет
кафедра електротехнічних систем
79049, Львів, вул. Коломийська, 4, кв. 140
тел. (0322) 226403, 0972453821
e-mail: karl.vasyliv@gmail.com; vasyliv_karl@ukr.net*

Vasyliv K.M.

A comparative analysis of processes in an independent generator with a noncontact cascade three-phase modulated exciter via a star-connected circuit under active-inductive loading.

By means of mathematical experiment, the author investigates electromagnetic and electromechanical processes in an independent electric power supply system based on an asynchronous generator with a three-phase modulated exciter. The processes are analyzed to specify the working capacity of the power supply system during its operation under active-inductive loading. Regularities of the electromagnetic and electromechanical processes behavior versus load intensity and the modulator scheme are identified.

Key words – asynchronous generator, synchronized machine, modulator, noncontact cascade modulated exciter, thyristor frequency converter, electromagnetic and electromechanical processes, mathematical experiment.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ И РАДИАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ НА БЕГУНЕ

Представлено результаты теоретичних та експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку коаксіально-лінійного синхронного двигуна зворотно-поступального руху в межах полюсного ділення з аксиальним та радіальним напрямом намагнічування постійних магнітів.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя возвратно-поступательного движения в пределах полюсного деления с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

ВВЕДЕНИЕ

В строительном производстве и других технологических процессах, связанных с перемещением, уплотнением, разрушением и так далее, применяются различные типы вибрационных машин [1]. Чаще всего в качестве возбудителя колебаний рабочего органа вибратора используются асинхронные двигатели с дебалансными системами возмущающих усилий [2]. Эти двигатели с дебалансным расположением возмущающих усилий имеют следующие недостатки: малую надежность работы вибраторов, большую энергоемкость, недостаточную эргономичность и автоматизацию систем управления.

В работе [3] предложен вибратор (рис. 1), приводом рабочего органа которого является коаксиально-линейный синхронный двигатель с постоянными магнитами, намагничивание которых аксиально совпадает с осью бегуна [КЛСД-ПМ-А].

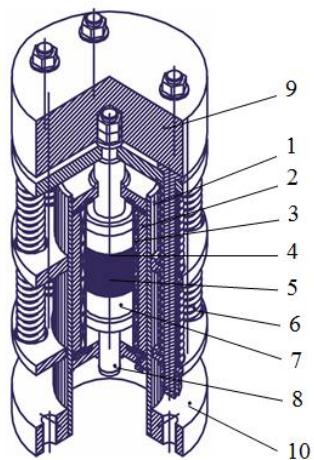


Рис. 1. Общий вид вибратора КЛСД-ПМ-А

Вибратор КЛСД-ПМ-А (рис.1) состоит из: статора (индуктора) – 1; магнитопровода статора – 2; обмотки статора – 3; бегуна – 4; постоянных магнитов (NdFeB) – 5; пружин – 6; концентраторов магнитного потока – 7; стержня бегуна – 8; дополнительной массы – 9; основания вибратора – 10.

Магнит с аксиальным направлением намагничивания коаксиально-линейного синхронного двигателя изображен на рис. 2.

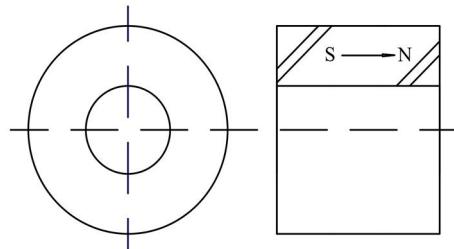


Рис. 2. Магнит с аксиальным направлением намагничивания

При поступлении на обмотку статора (3) от преобразователя частоты тока переменной полярности возникает электромагнитная сила, которая выводит из равновесия колебательную систему вибратора. Перемещение бегуна (4) и связанной с ним дополнительной массы (9) приводит к деформации пружин (6). При изменении направления прохождения тока в обмотках статора бегун перемещается в противоположную сторону под действием электромагнитной силы и накопленной в пружинах энергии, в результате чего возникает колебательное движение бегуна, которое передается на рабочий орган машины.

В строительном производстве, в частности, при погружении свай, шпунтов и других строительных изделий в грунт, используют вибропогружатели мощностью более 30 кВт [2]. Мощность вибропогружателя КЛСД-ПМ-А установки для погружения свай вибростатическим способом [4], разработанного в КНУБА, соответствовала 4,8 кВт. При этом диаметр магнитов составляет 110 мм.

Изготовление вибраторов большой мощности связано с большими размерами магнитов цилиндрической формы. Предельные размеры магнитов цилиндрической формы при существующих технологиях составляют в диаметре 250 мм [5].

Для увеличения мощности КЛСД-ПМ была предложена конструкция двигателя [6], где концентратор магнитного потока с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов изображен на рис. 3.

Концентратор (см. рис.3) состоит из постоянных магнитов с радиальным направлением намагничивания – 1 и установленного на поверхности магнитопровода – 2.

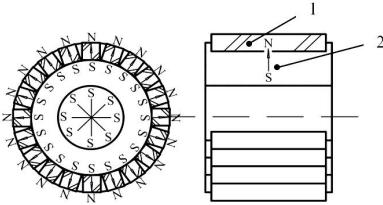


Рис. 3. Концентратор магнитного потока с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Такая конструкция концентратора магнитного потока позволит увеличить диаметр бегуна, а, следовательно, и мощность двигателя.

В работе [7] представлены математические модели, определяющие параметры электромеханических характеристик КЛСД-ПМ. Однако в ней недостаточно полно отображены результаты экспериментальных и теоретических исследований распределения магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя как с аксиальным, так и с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов. Не представлены их сравнительные характеристики по распределению магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном исследуемых двигателей. Поэтому данная работа является актуальной.

Целью работы является разработка методики экспериментального исследования характеристик $B = f(x)$ распределения магнитной индукции в воздушном зазоре КЛСД-ПМ с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов. Их сравнение с компьютерным моделированием, а также сравнение характеристик $B = f(x)$ двигателей с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛСД-ПМ (ПМ-А И ПМ-Р) ПРИ ОТСУТСТВИИ ТОКА В ОБМОТКАХ ИНДУКТОРА

Общий вид исследуемого коаксиально-линейного синхронного двигателя, состоящего из статора цилиндрической формы с индуктором – 1; пружинами – 2; подвижной частью КЛСД-ПМ бегуна с дополнительной массой – 3, представлен на рис. 4.

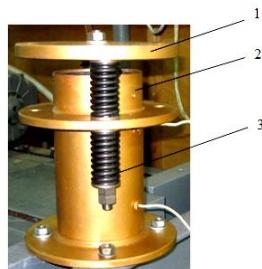


Рис. 4. Общий вид коаксиально-линейного синхронного двигателя

Длина активной части магнитопровода составляет 164 мм; активная длина бегуна 112 мм; диаметр бегуна 60 мм; масса постоянных магнитов 0,51 кг; воздушный зазор между индуктором и бегуном со-

ставляет 3 мм; немагнитный зазор 7 мм; толщина токового слоя индуктора составляет 5 мм; сечение провода обмотки индуктора $0,635 \text{ м}^2$; толщина магнитопровода индуктора 10 мм.

Магнитопровод индуктора выполнен из стальной проволоки диаметром 1 мм, уложенной на поверхности токового слоя (обмоток) индуктора с коэффициентом заполнения $K_3=0,32$.

На рис. 5 изображены: а – бегун КЛСД-ПМ с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов (ПМ-А); б – бегун КЛСД-ПМ с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов (ПМ-Р). Бегун (ПМ-А) (рис 5, а) состоит из: постоянных магнитов – 1; концентраторов магнитного потока – 2; металлического стержня – 3 (немагнитный материал). Бегун (ПМ-Р) (рис 5, б) состоит из: постоянных магнитов – 1; концентраторов – 2; металлического стержня – 3.



Рис. 5. Бегуны КЛСД-ПМ

Моделирование распределения магнитной индукции в зазоре между индуктором и бегуном КЛСД-ПМ-А. Для исследования компьютерного моделирования предложена модель коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов в программном пакете COMSOL Multiphysics (рис. 6), где: корпус статора – 1; обмотка статора – 2; магнитопровод статора – 3; бегун – 4; металлический стержень (немагнитный материал) – 5; постоянные магниты (ПМ) – 6; концентраторы магнитных потоков – 7; воздушная среда – 8.

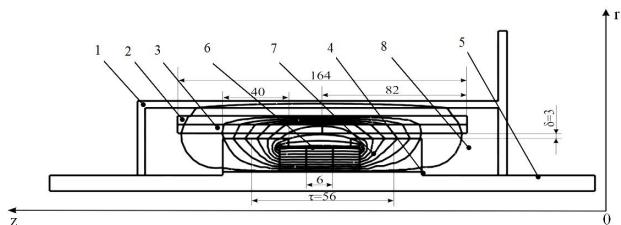


Рис. 6. Модель КЛСД-ПМ-А в программе COMSOL Multiphysics

Предложенная модель (рис. 6) КЛСД-ПМ-А имеет следующие параметры сред:

- относительная магнитная проницаемость для воздушной среды – 8: $\mu_r=1,0 \text{ Гн /м}$;
- относительная магнитная проницаемость для бегуна центральной части (стержня) – 5: $\mu_r=1,0 \text{ Гн /м}$;
- для магнитопровода индуктора – 3 выбран материал из библиотеки Soft Iron магнитомягкая сталь;
- для постоянных магнитов – 6: $\mu_r=1,06 \text{ Гн /м}$;
- остаточная индукция магнитов $B_r=1,20 \text{ Тл}$ (знак индукции чередуется по формуле SN).

Численный расчет магнитного поля выполнялся методом конечных элементов. Задача решалась как осесимметрическая в цилиндрической системе координат (zOr). Расчет параметров магнитной индукции в зазоре между бегуном и индуктором проводился без следующих конструктивных элементов статора, а именно поз. 1-3 (см. рис.6.). Результаты расчетов распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов показаны на рис. 9.

Моделирование распределения магнитной индукции в зазоре между индуктором и бегуном КЛСД-ПМ-Р. Для исследования компьютерного моделирования была разработана модель коаксиально-линейного синхронного двигателя с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов в программном пакете COMSOL Multiphysics (рис. 7), где: корпус статора – 1; обмотка статора – 2; магнитопровод статора – 3; бегун – 4; металлический стержень (немагнитный материал) – 5; постоянные магниты (ПМ) – 6; концентраторы магнитных потоков – 7; воздушная среда – 8.

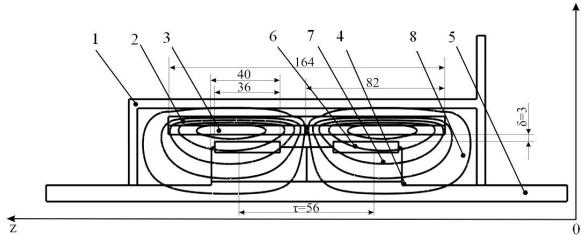


Рис. 7. Модель КЛСД-ПМ-Р в программе COMSOL Multiphysics

Предложенная модель (рис. 7) КЛСД-ПМ-Р имеет такие же параметры сред, как и в случае для модели КЛСД-ПМ-А.

Численный расчет магнитного поля для КЛСД-ПМ-Р, как и для двигателя для КЛСД-ПМ-А, выполнялся методом конечных элементов.

Результаты расчетов распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном с радиально направленным намагничиванием постоянных магнитов показаны на рис. 10.

Экспериментальные исследования распределения магнитной индукции в зазоре КЛСД-ПМ. Для проведения экспериментальных исследований коаксиально-линейного синхронного двигателя возвратно-поступательного движения КЛСД-ПМ-А и КЛСД-ПМ-Р разработан стенд (рис. 8). Стенд включает: коаксиально-линейный синхронный двигатель – 1; статор (магнитопровод индуктора) – 2; бегун КЛСД – 3; измерительный прибор магнитной индукции (Ш1-8) – 4; щуп (датчик) – 5.

Измерение магнитной индукции КЛСД-ПМ проводилось при помощи измерительного прибора Ш1-8 путем перемещения щупа в зазоре между индуктором и бегуном с шагом $\Delta x = 2,5$ мм по всей активной длине магнитопровода индуктора (рис. 9). Опыты проводились при различных положениях бегуна по отношению к индуктору в пределах полюсного деления τ , что соответствует максимальному значению амплитуды колебания X подвижной части двигателя.

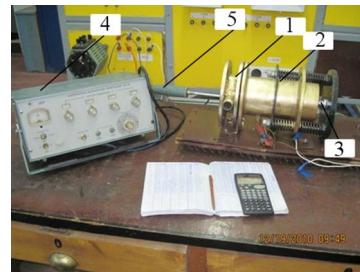


Рис. 8. Стенд для исследования магнитной индукции в зазоре КЛСД-ПМ

На рис. 9 представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

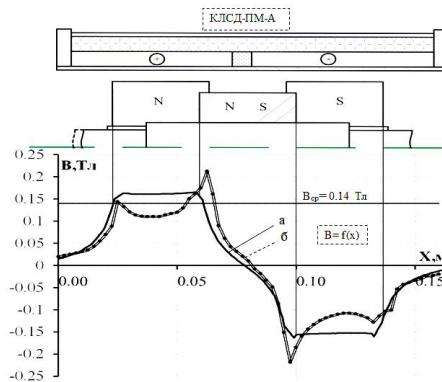


Рис. 9. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ-А: а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя, полученная в результате компьютерного моделирования; б – кривая $B = f(x)$, полученная экспериментальным путем

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования ($B_\delta = 0,16$ Тл), и результатом, полученным в ходе экспериментального исследования ($B_\delta = 0,20$ Тл), составляет 20 %.

На рис.10 представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования ($B_\delta = 0,211$ Тл), и результатом, полученным в ходе экспериментального исследования ($B_\delta = 0,216$ Тл), составляет 2,3 %.

На рис. 11. представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

Расхождение максимального значения индукции (см. рис.11) в воздушном зазоре двигателей с аксиальным ($B_\delta = 0,21$ Тл), и радиальным ($B_\delta = 0,16$ Тл), направлением намагничивания постоянных магнитов составляет 23 %.

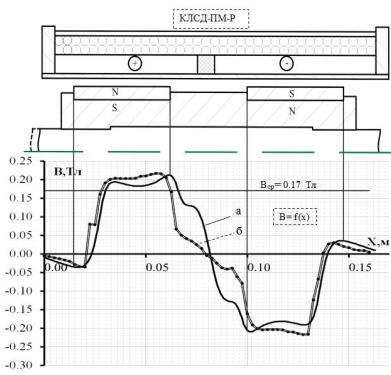


Рис. 10. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ-Р:
а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя, полученная в результате компьютерного моделирования;
б – кривая $B = f(x)$, полученная экспериментальным путем

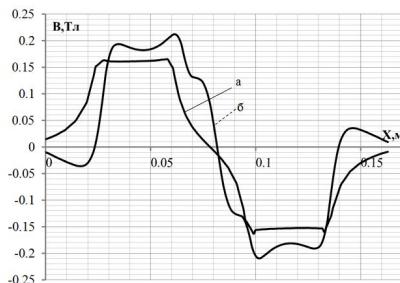


Рис. 11. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ (кривые распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя с аксиальным (а) и радиальным (б) направлениями намагничивания постоянных магнитов)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛСД-ПМ (ПМ-А И ПМ-Р) ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ОБМОТКАХ ИНДУКТОРА

Исследования показали, что модели двигателя КЛСД-ПМ, связанные с распределением магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном при наличии тока в обмотке индуктора, идентичны моделям, представленным на рис. 6, 7, а параметры сред отличаются только показаниями остаточной индукции магнитов, то есть $B_r=0$.

Численный расчет магнитного поля для КЛСД-ПМ-Р, как и для двигателя для КЛСД-ПМ-А, выполнялся методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Результаты расчетов распределения магнитной индукции в воздушном зазоре для двигателей КЛСД-ПМ-А и КЛСД-ПМ-Р показаны соответственно на рис. 13, 14.

На рис. 12 изображены: а – стенд для исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с постоянными магнитами с ПМ-А, ПМ-Р при наличии тока в обмотках индуктора; б – принципиальная электрическая схема стенда.

Стенд для исследования распределения магнитной индукции КЛСД-ПМ (рис. 11) включает: индуктор с обмоткой (ОИ) – 1; бегун КЛСД-ПМ – 2; индуктивный датчик (ИД) – 3; амперметр РА1 – 4; осциллограф ОСС – 5; автотрансформатор – Тр.

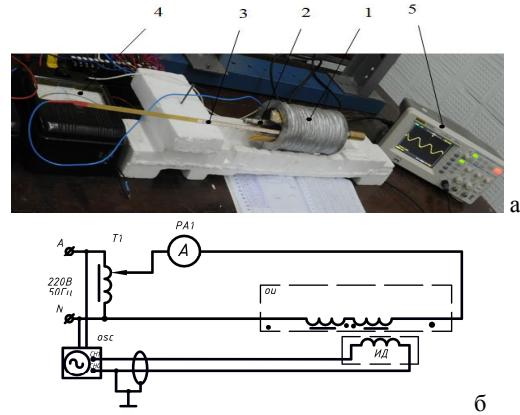


Рис. 12. Стенд для исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре КЛСД-ПМ

Экспериментальные исследования по определению значений магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном КЛСД-ПМ проводились следующим образом: на обмотку индуктора ОИ (рис. 12, б) через автотрансформатор Тр подается переменное напряжение с частотой $f = 50$ Гц, плотность тока в обмотке индуктора при этом составило $J = 3$ А/мм².

Опыты проводились при различных положениях датчика ИД в зазоре КЛСД-ПМ с шагом $\Delta x = 2,5$ мм по всей длине магнитопровода индуктора.

Индуктивный датчик ИД магнитной индукции протарирован согласно [8, 9], а также с применением некоторых положений из [9] по определению магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя.

Действующее значение ЭДС в индуктивном датчике ИД определяется согласно выражению:

$$E = 4,44 f_1 \cdot w_{\text{ид}} \cdot \Phi_{\text{max}}, \quad (1)$$

где f_1 – частота сети, Гц; $w_{\text{ид}}$ – число витков индуктивного датчика; Φ_{max} – максимальное значение магнитного потока, Вб.

Значение магнитной индукции вычисляется по формуле:

$$B_{\delta} = \Phi_{\text{max}} / \Delta S_{\text{ид}}, \quad (2)$$

где $\Delta S_{\text{ид}}$ – площадь катушки индуктивного датчика ИД ($\Delta S_{\text{ид}} = 25 \cdot 10^{-6}$), м².

На рис. 13 представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя КЛСД-ПМ-А.

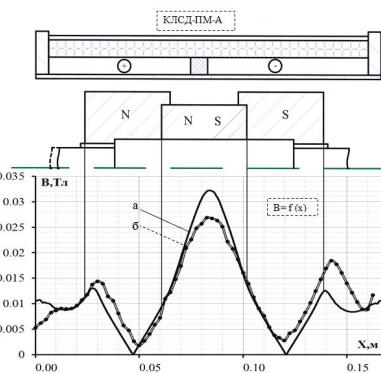


Рис. 13. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ-А:
а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя, полученная в результате компьютерного моделирования;
б – кривая $B = f(x)$, полученная экспериментальным путем

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования ($B_\delta = 0,032$ Тл), и результатом, полученным в ходе экспериментального исследования ($B_\delta = 0,026$ Тл), составляет 18 %.

На рис. 14 представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя КЛСД-ПМ-Р.

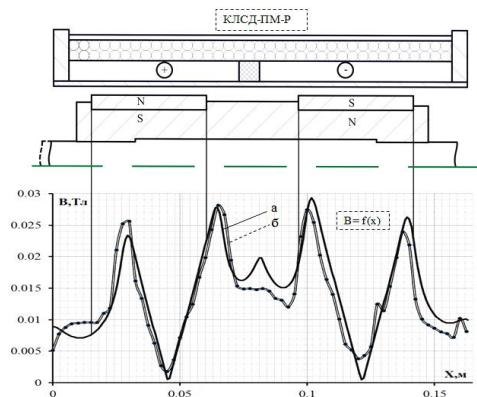


Рис. 14. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ-Р:

- а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя, полученная в результате компьютерного моделирования;
б – кривая $B = f(x)$, полученная экспериментальным путем

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования ($B_\delta = 0,029$ Тл), и результатом, полученным в ходе экспериментального исследования ($B_\delta = 0,028$ Тл), составляет 3,4 %.

ВЫВОДЫ

В результате компьютерного моделирования и экспериментального исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном двигателей КЛСД-ПМ при различных направлениях намагничивания постоянных магнитов (аксиально ПМ-А и радиально ПМ-Р), можно сделать следующие выводы.

Расхождение параметров магнитной индукции между результатами, полученными в ходе компьютерного моделирования, и результатами, полученными в ходе экспериментального исследования, составило от 3 до 15 %, что удовлетворяет требованиям при проектировании данного типа машин.

Сравнивая результаты исследований по распределению магнитной индукции в зазоре двигателей КЛСД-ПМ с радиальным ПМ-Р и аксиальным ПМ-А, более эффективным при одной и той же массе магнитов является применение магнитов для двигателей с радиальным направлением намагничивания. Так как расхождение максимальных значений индукции B_δ в воздушном зазоре исследуемых двигателей составляет 2 3%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блехман И.И. Что может вибрация? О "вibrationной механике" и vibrationной технике. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат.лит., 1988. – 208 с.

2. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. Учебное пособие для студентов строительных и автомобильно-дорожных вузов. М.: Выш. шк., 1977. – 255 с.

3. Патент на корисну модель № 24757 Vibrovobuditel'. E02D7/10(2007.01).E02D7/18(2007.01).E02D7/20(2007.01).Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., Пархоменко Д.И. 10.07.2007, Бюл № 10.

4. Патент на корисну модель № 57744. Пристрій для занурювання будівельних елементів, МПК, EO2D 7/20(2006.01), Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., Сидра А.М., Срібний В.О, 10.30.2011, Бюл. № 5.

5. www.vltar.ru, www.neomagnetics.com.

6. Патент на винахід № 93168 Лінійний електродвигун зворотно-поступального руху, МПК (2011.01) HD2K33/00 H02K41/025, Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С. 10.01.2011, Бюл № 1.

7. Голенков Г.М., Бондарь Р.П., Макогон С.А., Богаєнко М.В., Попков В.С. Моделирование работы электрического вибратора с коаксиально-линейным двигателем при разных законах регуляции // Техническая электродинамика. – 2007. – № 2. – С. 54-59.

8. Шимони К. Теоретическая электротехника. Мир, 1964. – 774 с.

9. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 2. – Машины переменного тока. Учебник для студентов высших техн. учеб. заведений. Изд. 3-е перераб. Л.: Энергия, 1973. – 648 с.

Bibliography (transliterated): 1. Blehman I.I. Chto mozhet vibraciya? O "vibrationnoj mehanike" i vibrationnoj tehnike. - M.: Nauka. Gl. red. Fiz.-mat.lit., 1988. - 208 s. 2. Bauman V.A., Byhovskij I.I. Vibracionnye mashiny i processy v stroitel'stve. Uchebnoe posobie dlya studentov stroitel'nyh i avtomobil'no-dorozhnyh vuzov. M.: Vyssh. shk., 1977. - 255 s. 3. Patent na korisnu model' № 24757 Vibrovobuditel'. E02D7/10(2007.01).E02D7/18(2007.01).E02D7/20(2007.01).Bogaenko M.V., Golenkov G.M., Golub V.P., Popkov V.S., Parhomenko D.I. 10.07.2007, Byul № 10. 4. Patent na korisnu model' № 57744. Pristrij dlya занурювання будівельnih elementiv, MPK, EO2D 7/20(2006.01), Bogaenko M.V., Golenkov G.M., Golub V.P., Popkov V.S., Sidra A.M., Sribnij V.O, 10.30.2011, Byul. № 5. 5. www.vltar.ru, www.neomagnetics.com. 6. Patent na vinahid № 93168 Linijnij elektrodvigun zvorotno-postupal'nogo ruhu, MPK (2011.01) HD2K33/00 H02K41/025, Bogaenko M.V., Golenkov G.M., Golub V.P., Popkov V.S. 10.01.2011, Byul № 1. 7. Golenkov G.M., Bondar' R.P., Makogon S.A., Bogaenko M.V., Popkov V.S. Modelirovanie raboty elektricheskogo vibratora s koaksial'no-linejnym dvigatelem pri raznyh zakonah reguliyacii // Tehnicheskaya elektrodinamika. - 2007. - № 2. - S. 54-59. 8. Shimoni K. Teoreticheskaya elekrotehnika. Mir, 1964. - 774 s. 9. Kostenko M.P., Piotrovskij L.M. Elektricheskie mashiny. Ch. 2. - Mashiny peremennogo toka. Uchebnik dlya studentov vysshih tehn. ucheb. zavedenij. Izd. 3-е pererab. L.: 'Energiya, 1973. - 648 s.

Поступила 24.10.2012

Голенков Геннадий Михайлович, к.т.н., доц.,
Аббасян Мохсен

Киевский национальный университет
строительства и архитектуры

03680, Киев, Воздухофлотский проспект, 31
e-mail: mohsen12849@yahoo.com

Golenkov G.M., Abbasian Mohsen

Airgap magnetic induction distribution in a coaxially-linear synchronous motor with axial and radial direction of the runner permanent magnets magnetization.

Results of theoretical and experimental research on magnetic induction distribution in the air gap of a coaxially-linear synchronous motor with reciprocal motion within the pole pitch and axial and radial direction of the permanent magnets magnetization are presented.

Key words – magnetic induction, airgap distribution, coaxially-linear synchronous motor, permanent magnets.

РОЗПОДІЛ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ ЛІНІЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА З МАГНІТНИМ ПІДВІСОМ

Представлені результати комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження розподілу магнітної індукції коаксіально-лінійного синхронного двигуна з магнітним підвісом (КЛСД-МП). Дослідження розподілу магнітної індукції проводилося в повітряному зазорі КЛСД-МП, а також на поверхні бігуна.

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования распределения магнитной индукции коаксиально-линейного синхронного двигателя с магнитным подвесом (КЛСД-МП). Исследования распределения магнитной индукции проводилось в воздушном зазоре КЛСД-МП, а также на поверхности бегуна.

ВСТУП

Коаксіально-лінійний синхронний двигун з магнітним підвісом (КЛСД-МП) [1] використовується у якості електромагнітного вібратора зі змінною резонансною частотою. Такі вібратори можуть застосовуватись при зануренні у ґрунт паль, шпунтів та інших будівельних елементів, а також для віброущільнення бетонних сумішей, ґрунтів тощо [2].

Загальний вигляд КЛСД-МП зображенено на рис. 1: МП – магнітний підвіс; В3 – віброзбуджувач; 1 – статор КЛСД-МП; 2 – підшипникові щити; 3 – вал бігуна; 4 – постійні магніти МП (NdFeB); 5 – концентратори магнітного потоку МП; 6 – магнітопровід індуктора МП; 7 – обмотка МП; 8 – концентратори магнітного потоку В3; 9 – постійні магніти В3 (NdFeB); 10 – магнітопровід індуктора В3; 11 – обмотка В3; 12 – пружина; 13 – додаткова маса.

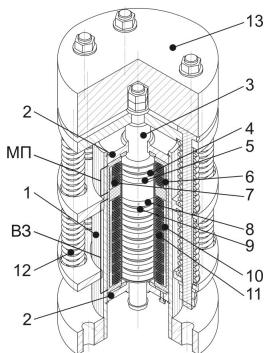


Рис. 1. Загальний вигляд коаксіально-лінійного двигуна з магнітним підвісом

За принципом дії КЛСД-МП складається з двох частин: віброзбуджувача (В3) та магнітного підвісу (МП) (див. рис. 1). Віброзбуджувач забезпечує вимушені механічні коливання бігуна. Магнітний підвіс використовується у якості "електромагнітної пружини" зі змінною жорсткістю для зміни резонансної частоти коливань.

Роботу КЛСД-МП можна пояснити наступним чином. При подачі на обмотку статора В3 від перетворювача частоти (ПЧ) струму змінної полярності виникає електромагнітна сила, яка виводить з положення рівноваги коливальну систему двигуна. Переміщення бігуна та пов'язаної з ним додатковою масою призводить до деформацій.

При зміні напрямку проходження струму в обмотках В3 бігун зміщується у протилежний до попереднього руху бік під дією електромагнітної сили і накопиченої в пружинах енергії, в результаті чого виникає коливальний рух бігуна.

Після подачі постійного струму на обмотку статора МП від регулятора струму виникає електромагнітна сила, яка за своїм впливом на бігун аналогічна до сили, що створюється дієкою деформованою ме-

ханічною пружиною.

Одним з найпоширеніших способів розрахунку електромагнітних сил, що виникають у електрических машинах, є їх визначення за максимальним значенням магнітної індукції [3].

В роботах [4,5] недостатньо були проведені дослідження по розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі віброзбуджувача КЛСД. В роботі [6] не були проведені дослідження по розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі магнітного підвісу, а також, дослідження по взаємному впливу магнітних полів В3 та МП при різних відстанях розташування їх індукторів один відносно іншого. Отже, дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП між індукторами В3 і МП та бігуном є актуальним.

Мета роботи. Визначення характеру розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП і впливу на нього відстані взаємного розташування віброзбуджувача та магнітного підвісу.

МОДЕЛЮВАННЯ КЛСД-МП

Для проведення комп'ютерного моделювання була розроблена модель КЛСД-МП в програмному пакеті COMSOL Multiphysics [7] (рис. 2): 1 – вал бігуна; 2 – корпус; 3 – повітряне середовище; 4 – магнітопровід статора; 5 – обмотки; 6 – концентратори магнітного потоку; 7 – постійні магніти; МП – магнітний підвіс; В3 – віброзбуджувач.

Для моделі встановлено наступні основні параметри середовища:

- відносна магнітна проникність для повітряного середовища (1) та валу (3): $\mu_r = 1,00$;

- для корпусу (2) та концентраторів магнітного потоку (6) з вбудованою бібліотеки матеріалів обрано Soft Iron (магнітом'яка сталь);

- для магнітопроводу статора (4) значення магнітної проникності $\mu_r(B)$ задано згідно табличних значень [8] як для електротехнічної сталі Э2312 (з такої сталі виготовлені магнітопроводи фізичної моделі КЛСД-МП);

- для постійних магнітів (7): $\mu_r = 1,06$ та залишкова індукція $B_r = \pm 1,20$ Тл (знак магнітної індукції чергується для магнітів В3 за формулою SN-NS-SN, див. рис. 2).

Чисельний розрахунок магнітного поля виконувався методом скінченних елементів. Задача розв'язувалася як віссесиметрична, в циліндричній системі координат, в площині roz для векторного потенціалу A , що має єдину φ -компоненту – $A = (0, A\varphi, 0)$, в магнітостатичному наближенні.

Розрахунок розподілу магнітної індукції бігуна при радіальній відстані $\Delta r = 1$ мм до його поверхні проводився без елементів статора поз. 2, 4, 5 (див. рис. 2) і при зворотній полярності постійних магнітів віброзбуджувача (за формулою NS-SN-NS). Результат розрахунків наведено на рис. 4 (крива – а).

© Голенков Г.М., Пархоменко Д.І.

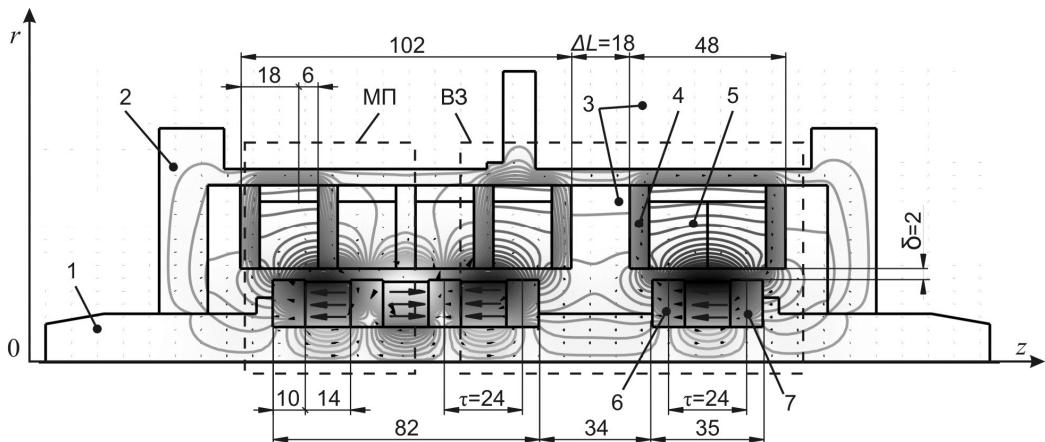


Рис. 2. Модель КЛСД-МП в програмному пакеті COMSOL Multiphysics

Результат розрахунків розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі між бігуном та магнітопроводами ВЗ і МП за умови відсутності струму в обмотках статора зображенено на рис. 6 (крива – а).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ НА БІГУНІ КЛСД-МП

Стенд для проведення дослідження зображенено на рис. 3, де: 1 – пінопластова оболонка; 2 – бігун КЛСД-МП; 3 – вимірювальний щуп; 4 – вимірювальна лінійка; 5 – текстолітові прокладки; 6 – вимірювач магнітної індукції.

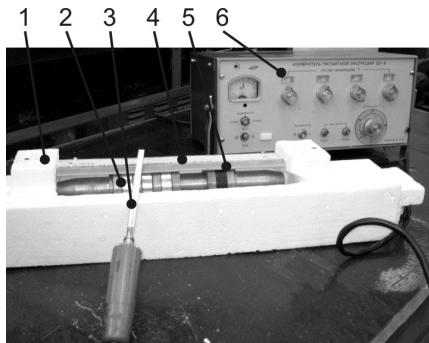


Рис. 3. Стенд для дослідження розподілу магнітної індукції бігуна КЛСД-МП с магнітним підвісом

Радіальна відстань від поверхні бігуна до вимірювального щупа складає $\Delta r=1$ мм.

За початок відліку береться точка на вісі z , у якій виміряне значення магнітної індукції ще наближається до 0. Така точка для приведеної моделі знаходитьться на 25 мм лівіше від крайнього лівого концентратора. Вимірювання значень індукції на поверхні бігуна КЛСД-МП проводяться з кроком $\Delta z=2,5$ мм. Вимірювання закінчується при досягненні координати $z=200$ мм, оскільки після неї вимірюні значення індукції наближаються до 0.

Розподіл магнітної індукції на поверхні бігуна КЛСД-МП, що був отриманий в ході експериментального дослідження фізичної моделі зображений на рис. 4 (крива – б).

Максимальне значення індукції для середньої пари полюсів віброзбуджувача складає: отримане розрахунком $B_{B3,p}=0,67$ Тл, отримане експериментом $B_{B3,e}=0,60$ Тл. Відносна відмінність між ними складає 10,4%. Для магнітного підвісу отримані наступні дані: $B_{MP,p}=0,41$ Тл, $B_{MP,e}=0,38$ Тл. Відносна відмінність – 7,3%.

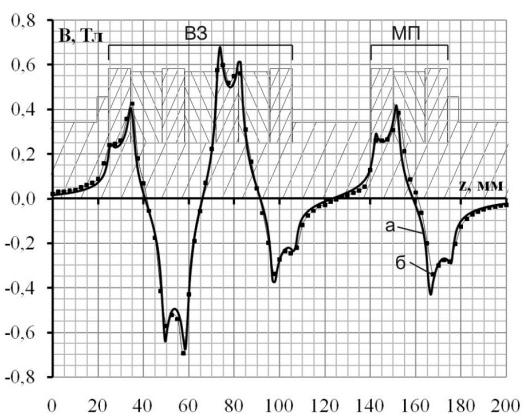


Рис. 4. Характер розподілу магнітної індукції на поверхні бігуна КЛСД-МП (заштриховані області – контур перерізу складових бігуна)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ В ПОВІТРЯНОМУ ЗАЗОРІ КЛСД-МП БЕЗ СТРУМУ В ОБМОТКАХ

Для проведення дослідження було розроблено стенд (рис. 5): 1 – корпус КЛСД-МП; 2 – бігун; 3 – кронштейн; 4 – вимірювач магнітної індукції; 5 – вимірювальний щуп; 6 – регулюючий гвинт; 7 – підшипниковий щит. За допомогою регулюючого гвинта 6 (див. рис. 5) бігун 2 встановлюється у положення, при якому полюси бігуна та статора знаходяться один напроти одного (у створі).

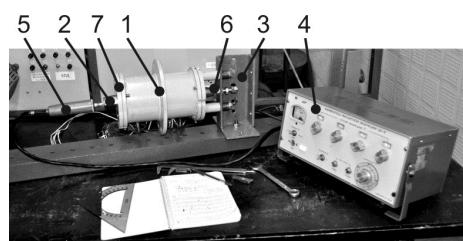


Рис. 5. Стенд для дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП

Вимірювання значень магнітної індукції у повітряному зазорі між бігуном та індукторами КЛСД-МП проведено з кроком $\Delta z=2,5$ мм. За початок вимірювань прийнято точку, що лежить на внутрішній поверхні лівого підшипникового щита 7 (див. рис. 5). В цій точці вимірюне значення магнітної індукції ще

наближається до 0. Вимірювання закінчується при досягненні координати $z=200$ мм, оскільки після неї виміряні значення індукції наближаються до 0.

Характер розподілу магнітної індукції у повітряному зазорі КЛСД-МП за експериментальними даними наведено на рис. 6 (крива – б). Максимальні значення індукції для середньої пари полюсів віброзбуджувача: $B_{\delta,B3,p}=0,54$ Тл, $B_{\delta,B3,e}=0,80$ Тл, відмінність – 32,5%. Для магнітного підвісу: $B_{\delta,MP,p}=0,42$ Тл, $B_{\delta,MP,e}=0,33$ Тл, відмінність – 21,4%.

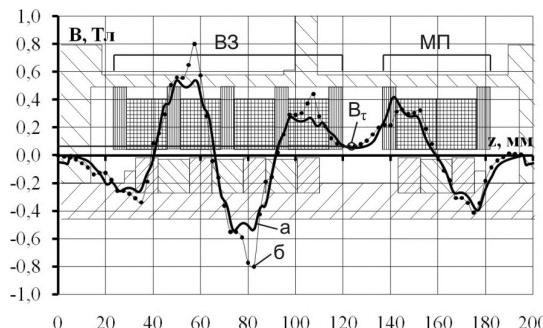


Рис. 6. Характер розподілу магнітної індукції в зазорі КЛСД-МП (заштриховані області – контур перерізу складових статору та бігуна)

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ НА МАГНІТНЕ ПОЛЕ ВІДСТАНІ ВЗАЄМНОГО РОЗТАШУВАННЯ ВІБРОЗБУДЖУВАЧА І МАГНІТНОГО ПІДВІСУ

Оцінка впливу відстані взаємного розташування між віброзбуджувачем і магнітним підвісом може бути зроблена залежністю мінімального значення магнітної індукції B_t в проміжку між ВЗ та МП від відстані між ними (див. рис. 6). Для приведеної в статті фізичної моделі ця відстань складає $\Delta L=18$ мм.

Залежність $B_t=f(\Delta L)$ була отримана моделюванням КЛСД-МП в програмному пакеті COMSOL Multiphysics і приведена на рис. 7.

З графіку видно, що при розміщенні індукторів ВЗ та МП без проміжку між ними ($\Delta L=0$ мм), мінімальне значення магнітної індукції складає $B_t=0,222$ Тл, що відповідає 52,8% від максимального значення магнітної індукції $B_{\delta,MP,p}$ полюса МП. При збільшенні відстані до $\Delta L=18$ мм, мінімальне значення індукції набуває $B_t=0,055$ Тл (13,1% від $B_{\delta,MP,p}$). З подальшим збільшенням ΔL мінімальне значення індукції B_t спадає за експонентою.

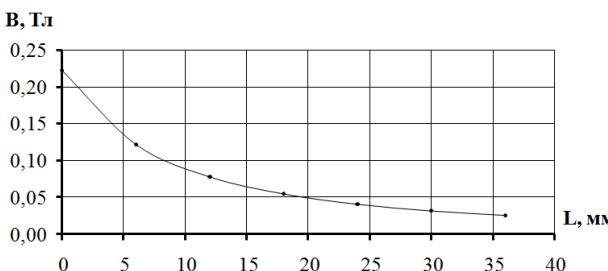


Рис. 7. Залежність $B_t=f(\Delta L)$ мінімального значення індукції в проміжку між індукторами МП та ВЗ від відстані між ними

Отже, значення довжини проміжку між індукторами ВЗ та МП при їх розміщенні в одному корпусі впливає на характери розподілу магнітного поля в їх активних зонах. Для зменшення впливу магнітних полів ВЗ та МП одне на одне пропонується значення довжини проміжку між індукторами обирати не меншим ніж величина полюсної поділки τ .

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ В ПОВІТРЯНОМУ ЗАЗОРІ КЛСД-МП ЗІ СТРУМОМ В ОБМОТКАХ

Конструкція стенду для дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП з струмом в обмотках наведена на рис. 8: 1 – корпус КЛСД-МП; 2 – автотрансформатор; 3 – вимірювальний щуп; 4 – амперметр; 5 – кронштейн; 6 – регулювальний гвинт; 7 – осцилограф.

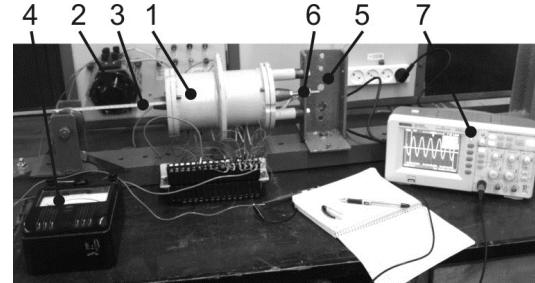


Рис. 8. Стенд для дослідження розподілу магнітної індукції КЛСД-МП зі струмом в обмотках

Обмотки ВЗ та МП фізичної моделі КЛСД-МП, що досліджується, складаються з 4 та 2 катушок (відповідно). Кожна катушка містить $w=550$ витків мідного емальованого проводу перерізом $S_{np}=0,418$ мм².

Для проведення дослідження був розроблений вимірювальний щуп (рис. 9), що являє собою текстолітову рейку, в кінці якої розміщена катушка з 40 витків тонкого мідного ізольованого проводу (індуктивний датчик ІД). Катушка намотана на каркас 5×5 мм. У бічній стороні рейки, в пазу, розміщаються провідники, що під'єднані до катушки. Провідники з'єднані з коаксіальним екранизованим проводом.

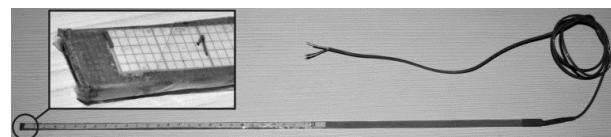


Рис. 9. Зовнішній вигляд вимірювального щупа

Принципова електрична схема стенду зображена на рис. 10: МП – обмотки магнітного підвісу; ВЗ – обмотки віброзбуджувача; ІД – датчик вимірювального щупа; Т1 – автотрансформатор; OSC – осцилограф; PA1 – амперметр. Стенд підключається до джерела змінної напруги $U=220$ В з частотою $f=50$ Гц.

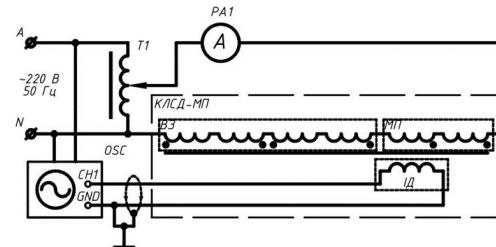


Рис. 10. Принципова електрична схема стенду

Визначення магнітної індукції в повітряному зазорі КЛСД-МП проводиться обчисленням по значенням, наведеним ЕРС у датчику ІД вимірювального щупа 3 (див. рис. 8). Для встановлення величини змінного струму через обмотки двигуна $I=1,0$ А використовується автотрансформатор 2, а для його контролю – амперметр 4.

Вимірювання значень наведеної у датчику ЕРС проведено з кроком $\Delta z=2,5$ мм. За початок відліку прийнято точку, у якій вимірює значення ЕРС ще наближається до 0. Така точка для приведеної моделі знаходиться на відстані 2,5 мм від внутрішньої поверхні підшипникового щита. Бігун встановлюється у початкове положення (як у попередньому дослідженні).

Для обчислення значень магнітної індукції $|B_{em}|$ по відповідним значенням вимірюючої ЕРС використовувався вираз:

$$|B_{em}| = \frac{S_{i\partial} E}{4,44 f w_{i\partial}}, \quad (1)$$

де $S_{i\partial}$ – площа катушки індуктивного датчика ІД ($S_{i\partial}=25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$); E – вимірює значення ЕРС, В; f – частота мережі ($f=50$ Гц); $w_{i\partial}$ – кількість витків індуктивного датчика ІД ($w_{i\partial}=40$).

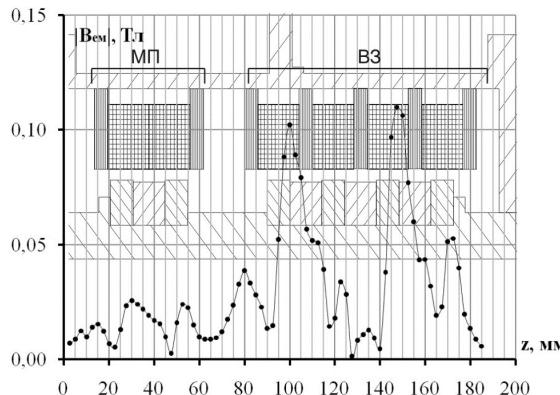


Рис. 11. Характер розподілу магнітної індукції в зазорі КЛСД-МП зі струмом в обмотках (заштриховані області – контур перерізу складових статору та бігуна)

Характер розподілу магнітної індукції у повітряному зазорі між статором та бігуном КЛСД-МП зі струмом в обмотках $I=1,0$ А наведено на рис. 11.

Максимальне значення індукції для середнього полюса віброзбуджувача за результатами експериментального дослідження складає $|B_{em,B3}|=0,110$ Тл, для магнітного підвісу – $|B_{em,Mp}|=0,026$ Тл.

ВИСНОВОК

В ході роботи по дослідженню розподілу магнітної індукції КЛСД-МП були розроблені експериментальні стенди та методика випробування. Отримані максимальні значення індукції дослідним шляхом та розрахунком різняться в межах 10,4% для віброзбуджувача і 7,3% для магнітного підвісу. Цю розбіжність можна пояснити неточностями вимірювань під час проведення експериментальних досліджень.

За результатами досліджень було виявлено, що вплив магнітних полів ВЗ та МП одне на одне при розміщенні їх індукторів в одному корпусі є значним при розташуванні їх безпосередньо один біля одного. При збільшенні проміжку між ними до значення більшого за полюсну поділку взаємний вплив зменшується до прийнятної величини.

Отримані результати по дослідженню розподілу магнітної індукції КЛСД-МП можуть використовуватись при проектуванні електрических машин такого типу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент на корисну модель №51151. Віброзбуджувач. Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Пархоменко Д.І. та інші. Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи та корисні моделі", 10.07.2010 р., бюл. №13.
2. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. Учеб. пособие для студ. строительных и автомобиль и автомобильно-дорожных вузов. М., "Высш. Школа", 1977, 255 с. с ил.
3. А.В. Иванов-Смоленский. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов по спец. "Электромеханика". - М: Высш. шк., 1989. – 312 с.: ил.
4. Голенков Г.М., к.т.н., Пархоменко Д.І., Дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі лінійного синхронного двигуна з магнітним підвісом // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. - 2012.-№ 1 - с. 22-24.
5. Голенков Г.М., к.т.н., доц., Бондар Р.П., Макогон С.А., Подольцев А.Д., д.т.н. Численный расчет магнитного поля и основных характеристик электровибратора на основе коаксиально-лінійного двигателя з постійними магнітами // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. - 2007.-№ 1 - с. 8-12.
6. Голенков Г.М., к.т.н., Пархоменко Д.І., Макогон С.А., Бондар Р.П. Моделювання роботи коаксіально-лінійного синхронного вібратора з магнітним підвісом // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. - 2008.-№ 1 - с. 18-20.
7. www.comsol.com
8. В.Г. Герасимов, П.Г. Грудинский, Л.А. Жукова и др., Електротехнический справочник 6-е изд., том 1. – М: Енергия, 1980.

Bibliography (transliterated): 1. Patent na korisnu model' №51151. Vibrozbudzhuvach. Bojaenko M.V., Golenkov G.M., Parhomenko D.I. ta inshi. Vidano vidpovidno do Zakonu Ukrayini "Pro ohoronu praw na vinahodi ta korisni modeli", 10.07.2010 r., byul. №13. 2. Bauman V.A., Byhovskij I.I. Vibracionnye mashiny i processy v stroitel'stve. Ucheb. posobie dlya stud. stroitel'nyh i avtomobil' i avtomobil'no-dorozhnyh vuzov. M., "Vyssh. Shkola", 1977, 255 s. s il. 3. A.V. Ivanov-Smolenskij. Elektromagnitnye sily i preobrazovanie 'energii v elektricheskikh mashinah: Ucheb. posobie dlya vuzov po spec. "Elektromehanika". - M: Vyssh. shk., 1989. - 312 s.: il. 4. Golenkov G.M., k.t.n., Parhomenko D.I., Doslidzhennya rozpodilu magnitnoi indukciyi v povityranomu zazori linijnogo sinhronnogo dviguna z magnitnim pidvisom // Elektrotehnika i elektromehanika: Naukovo-praktichnij zhurnal. - 2012.-№ 1 - s. 22-24. 5. Golenkov G.M., k.t.n., doc., Bondar R.P., Makogon S.A., Podol'cev A.D., d.t.n. Chislennyj raschet magnitnogo polya i osnovnyh harakteristik 'elektrovibratora na osnove koaksial'n-o-linijnego dvigatelya s postoyannymi magnitami // Elektrotehnika i elektromehanika: Naukovo-praktichnij zhurnal. - 2007.-№ 1 - s. 8-12. 6. Golenkov G.M., k.t.n., Parhomenko D.I., Makogon S.A., Bondar R.P. Modeluyvannya roboti koaksial'n-o-linijnogo sinhronnogo vibratora z magnitnim pidvisom // Elektrotehnika i elektromehanika: Naukovo-praktichnij zhurnal. - 2008.-№ 1 - s. 18-20. 7. www.comsol.com. 8. V.G. Gerasimov, P.G. Grudinskij, L.A. Zhukova i dr., 'Elektrotehnicheskij spravochnik 6-e izd., tom 1. - M: 'Energiya, 1980.

Надійшла 25.10.2012

Голенков Геннадій Михайлович, к.т.н., доц.
Пархоменко Д.І.
Київський національний університет будівництва
і архітектури
кафедра електротехніки та електроприводу
03680, Київ, Повітофлотський проспект, 31
тел. 066 4431611, 067 2336450
e-mail: parkhomenkodm@gmail.com

Golenkov G.M., Parkhomenko D.I.

Magnetic induction distribution in a linear synchronous motor with magnetic suspension.

Results of computer simulation and experimental investigations of magnetic induction distribution in a coaxial linear synchronous motor with magnetic suspension are presented. The magnetic induction distribution has been studied both in the motor air gap and on the runner surface.

Key words – coaxial linear synchronous motor, magnetic suspension, magnetic induction distribution.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА НА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОРМАЛИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ НА БАЗЕ КРИВЫХ РОСТА

Виконано прогнозування попиту на машини постійного струму, що випускаються ПАТ "Електромашин" (м. Харків), з використанням формалізованих моделей на базі кривих зростання. Встановлені типи машин постійного струму, які найбільші перспективні для проведення модернізації.

Выполнено прогнозирование спроса на машины постоянного тока, выпускаемые ПАО "Электромашин" (г. Харьков), с использованием формализованных моделей на базе кривых роста. Установлены типы машин постоянного тока, которые наиболее перспективны для проведения модернизации.

ВВЕДЕНИЕ

По целому ряду причин, современная ситуация развития отечественных машин постоянного тока (МПТ) характеризуется тем, что производители занимаются не созданием новых серий машин, а модернизацией морально устаревших серий или обновлением уже выпускаемой серии. Также участились случаи, когда предприятия-конкуренты отслеживают наиболее востребованные типы и отрезки серии МПТ, вносят незначительные изменения и выпускают подобные машины, но уже под другим обозначением. Такие случаи тоже формально относятся к модернизации.

Необходимость проведения модернизации МПТ объясняется: новыми требованиями, которые выдвигают заказчики; включением в серию новых модификаций, не оговоренных в действующих технических условиях; повышением конкурентоспособности выпускаемых машин и пр.

Естественно, что в первую очередь модернизации или замене должны подвергаться те МПТ, на которые уже имеется или ожидается значительный спрос. Поэтому задача анализа и прогнозирования спроса на МПТ является важной, т.к. позволяет определить конкретные типы или серию машин, модернизация которых принесет существенную прибыль. Кроме того, прогнозирование позволяет предприятию эффективно использовать информацию о необходимых финансовых и материальных ресурсах (требуемая для производства номенклатура материалов и комплектующих изделий).

Имеющиеся на предприятиях специалисты по маркетингу в лучшем случае используют так называемую "интуитивную модель" прогнозирования, работа со сложными моделями, такими как модель Хольта, многослойная искусственная нейросеть [1] и др., вызывает затруднение, так как требует наличия глубоких знаний в эконометрике и опыта работы со специализированными статистическими программами.

Поэтому, для работников предприятий необходимо достаточно простой инструмент, которым они могли бы пользоваться, имея минимальный объем знаний. В качестве такого инструмента могут служить кривые роста спроса, анализ и экстраполяцию которых можно использовать для прогнозирования спроса на МПТ.

Данная работа является продолжение исследований начатых в [1], где были рассмотрены статистические модели прогнозирования спроса только для "железнодорожных" МПТ. Целью данной работы является прогнозирование спроса на основные типы МПТ, выпускаемые ПАО "Электромашин" (г. Харьков), с использованием формализованных моделей на базе кривых роста.

ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

В силу многообразия и специфики номенклатуры МПТ, выпускаемых ПАО "Электромашин", невозможно рассматривать каждый тип машины по отдельности. Поэтому, все выпускаемые МПТ в зависимости от назначения были условно подразделены на четыре группы: "железнодорожные", "рудничные", краново-металлургические (сокращенно "крановые") и общепромышленного назначения (сокращенно "общепромышленные").

В работе [1] уже было перечислены серии и отдельные типы МПТ входящие в группу "железнодорожные", но все равно напомним их: П2КМ, 2П2КМ, 5ПСГМ, 5ПСГМП, ПНЖ-132, 4ПНЖ200S, 4ПНЖ200M и 4ПНГУК315M. В группу рудничные входят машины: ДРТ-10, ДРТ-12, ДРТ-13, ДРТ-14, ДРТ-23,5, ДРТ-33, ДТН-12/7, ДТН-33/20, ДТН-34/25M, ДТН-45/27, ДТН-46/33M. К крановым машинам относятся МПТ серии "Д": Д12M, Д21M, Д22M, Д31M, Д32M, Д41M, Д806M, Д808M, Д810M, Д812M, ДПЭ-52M, ДПВ-52M, ДК-309M, ДК-213M. К машинам общепромышленного назначения относятся МПТ серии 4П с высотой оси вращения от 200 до 400 мм и серии 5П с высотой оси вращения от 100 до 160 мм.

Для проведения расчетов будем использовать данные заказов МПТ на ПАО "Электромашин". Ретроспектива представляет собой данные по заказам за период с января 2007 года по декабрь 2010 года включительно, с месячной динамикой.

Данные по заказам в штучном выражении для каждой группы машин представлены: в табл. 1 и на рис. 1 (кривая 1) – "железнодорожные", в табл. 2 и на рис. 2 (кривая 1) – "рудничные", в табл. 3 и на рис. 3 (кривая 1) – "крановые" и в табл. 4 и на рис. 4 (кривая 1) – "общепромышленные".

Таблица 1

Месяц	Количество заказанных "железнодорожных" МПТ, шт. (по годам)			
	2007	2008	2009	2010
Январь	23	25	23	45
Февраль	24	50	21	91
Март	27	40	19	85
Апрель	9	84	60	71
Май	11	48	59	72
Июнь	28	23	46	38
Июль	56	30	38	75
Август	56	36	46	72
Сентябрь	44	47	47	101
Октябрь	24	63	67	103
Ноябрь	22	12	57	65
Декабрь	46	25	31	66

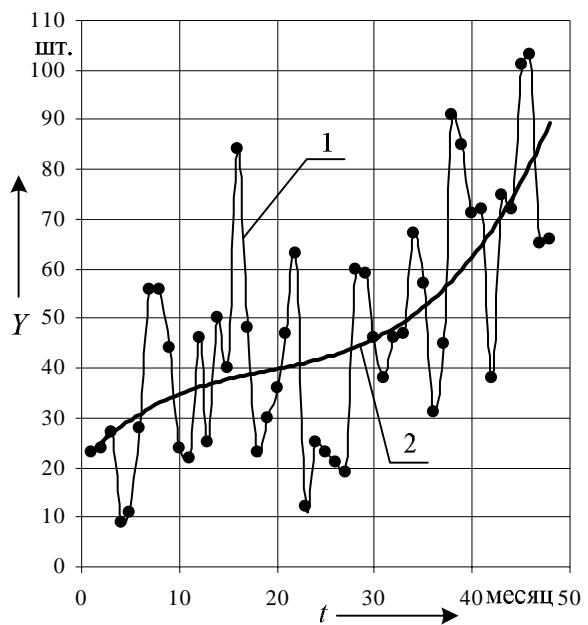


Рис. 1. График помесечного спроса и кривая роста на "железнодорожные" МПТ

Таблица 2

Месяц	Количество заказанных "рудничных" МПТ, шт. (по годам)			
	2007	2008	2009	2010
Январь	40	16	0	10
Февраль	33	13	7	6
Март	15	16	5	5
Апрель	38	42	8	25
Май	38	34	12	49
Июнь	33	30	2	38
Июль	43	66	0	77
Август	40	39	7	62
Сентябрь	15	29	4	60
Октябрь	43	10	2	40
Ноябрь	8	45	8	35
Декабрь	40	25	18	76

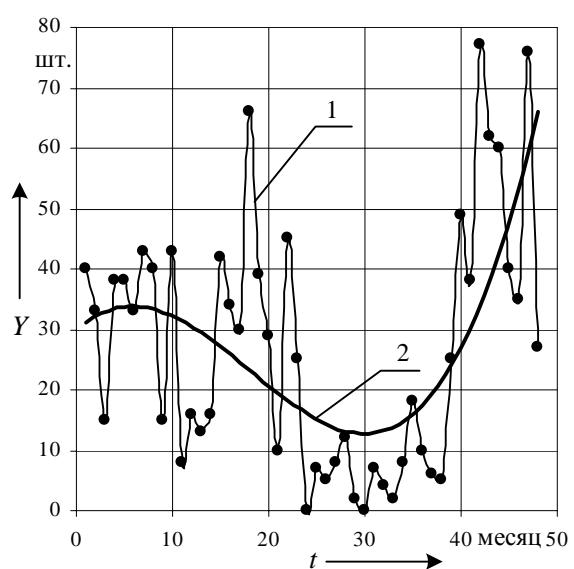


Рис. 2. График помесечного спроса и кривая роста на "рудничные" МПТ

Таблица 3

Месяц	Количество заказанных "крановые" МПТ, шт. (по годам)			
	2007	2008	2009	2010
Январь	15	17	1	15
Февраль	39	2	4	10
Март	26	22	9	7
Апрель	37	33	1	8
Май	10	21	4	18
Июнь	29	39	13	29
Июль	25	30	31	8
Август	24	59	6	5
Сентябрь	19	45	10	15
Октябрь	36	53	22	8
Ноябрь	15	34	17	5
Декабрь	15	14	7	0

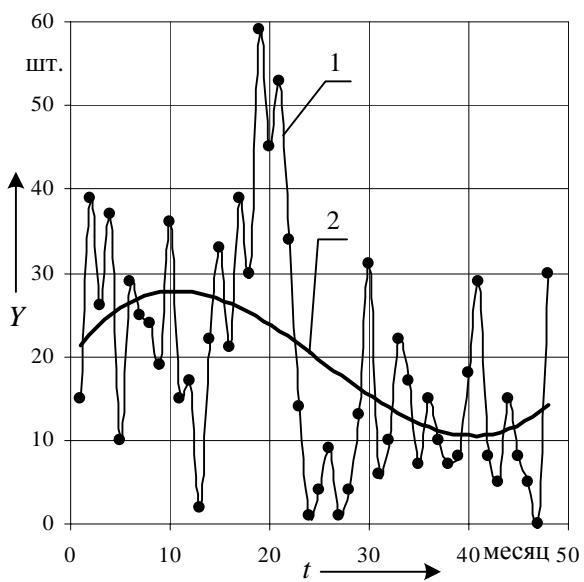


Рис. 3. График помесечного спроса и кривая роста на "крановые" МПТ

Таблица 4

Месяц	Количество заказанных "общепромышленных" МПТ, шт. (по годам)			
	2007	2008	2009	2010
Январь	11	9	1	5
Февраль	10	5	2	5
Март	50	41	7	3
Апрель	14	19	3	1
Май	28	10	4	1
Июнь	41	27	4	6
Июль	13	19	0	8
Август	20	30	3	3
Сентябрь	19	28	4	2
Октябрь	12	25	10	1
Ноябрь	15	14	11	3
Декабрь	11	10	23	2

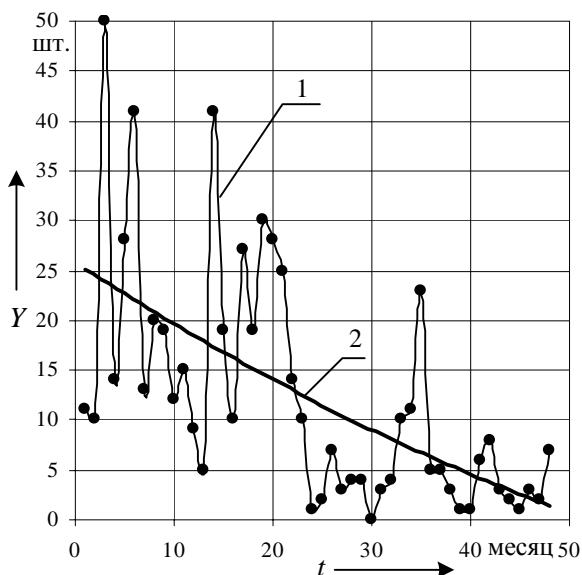


Рис. 4. График помесячного спроса и кривая роста на "общепромышленные" МПТ

ВЫБОР ФОРМАЛИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КРИВЫХ РОСТА

Одними из простейших средств для выделения тенденций во временных рядах являются кривые роста или тренды [2]. Попробуем применить их к нашим рядам.

В настоящее время в литературе описано несколько десятков кривых роста. Эти модели условно могут быть разделены на три класса в зависимости от того, какой тип динамики развития они хорошо описывают [2].

К I классу относятся функции, используемые для описания процессов с монотонным характером тенденции развития и отсутствием пределов роста. Эти условия справедливы для многих экономических показателей, например, для большинства показателей промышленного производства в натуральном выражении.

Ко II классу относятся кривые, описывающие процесс, который имеет предел роста в исследуемом периоде. Функции, относящиеся ко II классу, называются кривыми насыщения. Если кривые насыщения имеют точки перегиба, то они относятся к III классу кривых роста – к S-образным кривым.

В нашем случае будем использовать следующие кривые роста [2, 3]:

- полиномы первого, второго, третьего порядков;
- показательная кривая:
- показательная кривая:

$$Y_t = a \cdot b^t; \quad (1)$$

- кривая Гомперца:

$$Y_t = k \cdot a^{b^t}; \quad (2)$$

- логистическая кривая:

$$Y_t = \frac{k}{1 + b \cdot e^{-at}}. \quad (3)$$

В качестве критерия выбора наилучшей кривой предлагается использовать среднеквадратическую ошибку (*MSE*), которая определяется по формуле:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - \tilde{Y}_t)^2, \quad (4)$$

где *n* – количество членов временного ряда; *Y_t* – фактическое значение исследуемой величины в момент времени *t*; *Ŷ_t* – прогнозируемое значение исследуемой величины в момент времени *t*.

На рис. 1-4 (кривая 2) приведены кривые роста, аппроксимирующие соответствующие данные наилучшим образом (с учетом выбранного нами критерия – *MSE*).

Спрос на "железнодорожные" МПТ аппроксимируется наилучшим образом с помощью полинома третьего порядка, при этом *MSE* = 301,9. Уравнение полинома:

$$Y_G(t) = 21,0507 + 2,113 \cdot t - 0,090185 \cdot t^2 + 0,00158021 \cdot t^3. \quad (5)$$

Спрос на "рудничные" МПТ аппроксимируется наилучшим образом также с помощью полинома третьего порядка, при этом *MSE* = 262,24. Уравнение полинома:

$$Y_R(t) = 29,6004 + 1,56396 \cdot t - 0,160857 \cdot t^2 + 0,00300105 \cdot t^3. \quad (6)$$

Спрос на "крановые" МПТ аппроксимируется наилучшим образом также с помощью полинома третьего порядка. При этом *MSE* = 155,2. Уравнение полинома:

$$Y_K(t) = 19,7492 + 1,66696 \cdot t - 0,0991176 \cdot t^2 + 0,00129253 \cdot t^3. \quad (7)$$

Спрос на "общепромышленные" МПТ практически одинаково хорошо аппроксимируется с помощью полиномов, показательной кривой или кривой Гомперца, на рис. 4 (кривая 2) приведен полином второго порядка, при этом *MSE* = 86,4. Уравнение полинома:

$$Y_O(t) = 25,7993 - 0,644257 \cdot t + 0,00284766 \cdot t^2. \quad (8)$$

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА

Для прогнозирования спроса на 2011 г. полученные кривые роста спроса были экстраполированы, т.е. мы воспользовались полученными формализованными моделями. Экстраполированные кривые роста спроса по каждой группе МПТ приведены на рис. 5.

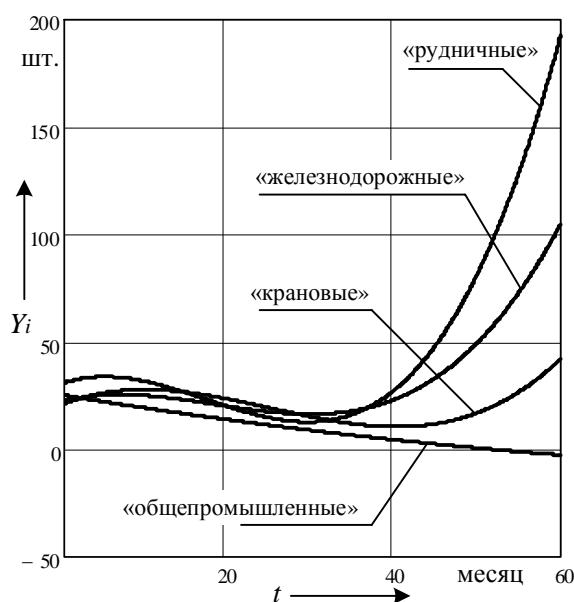


Рис. 5. Графики кривых роста спроса по четырем группам МПТ экстраполированные на 2011 г.

Как видно из рис. 5 наибольший спрос ожидается на "рудничные" МПТ, вторыми идут "железнодорожные", за ними "крановые" и отрицательный спрос на "общепромышленные". Относительно "общепромышленных" МПТ, любая из рассмотренных моделей будет давать отрицательный спрос. Это объясняется тем, что кривая роста имеет ниспадающую динамику и свидетельствует о падении спроса на эти МПТ.

Для оценки работоспособности полученных моделей сравним рассчитанные данные с реальными данными заказов МПТ за 2011 год. Данные заказов МПТ, выпущенных ПАО "Электромашина" за 2011 г., приведены в табл. 5.

Таблица 5

Месяц	Количество действительно заказанных МПТ в 2011 году, шт.			
	"железнодорожные"	"рудничные"	"крановые"	"общепром"
Январь	53	27	4	1
Февраль	51	56	0	7
Март	43	45	22	7
Апрель	73	47	12	12
Май	46	42	20	10
Июнь	88	62	18	5
Июль	100	64	26	6
Август	86	67	24	12
Сентябрь	120	57	30	5
Октябрь	126	61	43	11
Ноябрь	121	65	58	8
Декабрь	98	32	32	5

В целом модели демонстрируют хорошее совпадение, единственным отличием от нашего прогноза является то, что наибольшим спросом пользуются "железнодорожные", а не "рудничные" МПТ. Заказы на "общепромышленные" МПТ стабильны и не превышают 12 машин.

ВЫВОДЫ

1. Формализованные модели на базе кривых роста спроса достаточно просты для использования их при прогнозировании. Они позволяют получить качественную картину и усредненную оценку ожидаемого спроса на МПТ.

2. Ситуация с распределением занятых "мест" по спросу МПТ показывает, что необходимо ежемесячный учет поступаемых данных заказов и соответствующая корректировка математических моделей.

3. По результатам анализа и прогнозирования можно уверенно сказать, что наибольший интерес при модернизации необходимо уделять "железнодорожным" и "рудничным" МПТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинина, О.Н. Анализ статистических моделей прогнозирования спроса на машины постоянного тока специального назначения [Текст] / О.Н. Дубинина, В.П. Шайда, В.А. Дубинин // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2010. - № 01(77). – С. 81-85.
2. Мезенцев, Ю.А. Экономико-математические методы [Текст] : учеб. пособие. / Ю.А. Мезенцев – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 212с.
3. Экономико-математические методы и прикладные модели [Текст] : учеб. пособие для вузов / В.В. Федосеев, А.Н. Гармаш, И.В. Орлова, В.А. Половников; под ред. В.В. Федосеева. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2005. – 304с.

Bibliography (transliterated): 1. Dubinina, O.N. Analiz statisticheskikh modelej prognozirovaniya sprosa na mashiny postoyannogo toka spetsial'nogo naznacheniya [Tekst] / O.N. Dubinina, V.P. Shajda, V.A. Dubinin // Elektrotehnichni ta kompyuterni sistemi. - 2010. - № 01(77). - S. 81-85. 2. Mezencov, Yu.A. 'Ekonomiko-matematicheskie metody [Tekst] : ucheb. posobie. / Yu.A. Mezencov - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. - 212s. 3. 'Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli [Tekst] : ucheb. posobie dlya vuzov / V.V. Fedoseev, A.N. Garmash, I.V. Orlova, V.A. Polovnikov; pod red. V.V. Fedoseeva. - 2-e izd. pererab. i dop. - M.: YuNITI-DANA, 2005. - 304s.

Поступила 08.11.2012

Дубинин Владимир Алексеевич
кафедра автоматизированных систем управления
Шайда Виктор Петрович, к.т.н., доц.
кафедра электрических машин
Дубинина Оксана Николаевна, к.т.н.
кафедра компьютерной математики
и математического моделирования
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
e-mail: viktorshayda08@rambler.ru

Dubinin V.A., Shayda V.P., Dubinina O.N.
Demand forecasting for dc machines with application of formalized growth-curve-based models.
Demand forecasting for DC machines produced by ELECTROMASHINA Public Corporation (Kharkov, Ukraine) is performed with application of formalized models based on growth curves. Types of DC machines which are most promising for rebuilding are ascertained.
Key words – DC machines, growth curves based models, demand forecasting.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В ПОЛОМ ПЕРФОРИРОВАННОМ РОТОРЕ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Отримано закони просторового розподілу щільності струму у порожнисному перфорованому роторі у вигляді картин і залежностей. Встановлено залежності активного хвильового опору від ковзання для порожнисного гладкого і перфорованого ротора при різних значеннях конструктивних параметрів. Запропоновано вираз для визначення активного хвильового опору порожнисного перфорованого ротора.

Получены законы пространственного распределения плотности тока в полом перфорированном роторе в виде картин и зависимостей. Установлены зависимости активного волнового сопротивления от скольжения для полого гладкого и перфорированного ротора при различных значениях конструктивных параметров. Предложено выражение для определения активного волнового сопротивления полого перфорированного ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Полифункциональные электромеханические преобразователи (ПЭМП) с полым перфорированным ротором (ППР), относятся к новому классу электромеханических устройств. Важным вопросом проектирования ПЭМП с ППР является оценка реального распределения вихревых токов (ВТ), как по толщине, так и вдоль оси ППР. Вместе с тем, именно характер распределения ВТ определяет величину активного сопротивления массивного ротора, которое играет первостепенную роль в формировании выходных характеристик и свойств ПЭМП. Распределение ВТ, индуцированных в массиве ППР, носит сложный характер, установление которого возможно при использовании трехмерной математической модели, учитывающей особенности геометрии массива, эффект вытеснения тока и фактор конечной длины. Необходимо отметить, что создание таких математических моделей представляет значительный интерес в плане совершенствования теории электромеханических преобразователей с массивной вторичной частью.

Ввиду принципиальных особенностей распределения электромагнитного поля в активной зоне ПЭМП с ППР, а также отсутствия работ, рассматривающих влияние перфораций ферромагнитного ротора на параметры и характеристики электромеханических преобразователей, актуальными задачами на пути к формированию единой теоретической базы и созданнию методик проектирования ПЭМП с ППР являются:

- установление новых зависимостей и особенностей распределения ВТ в ППР, отражающих реальный трехмерный характер поля;

- определение активного сопротивления ППР и его зависимостей от геометрии массива.

Решение поставленных задач выполнялось с помощью конечно-элементной модели, построенной в программе Comsol Multiphysics 3.5a и представленной в работах [1, 2]. Расчеты проводились для экспериментального образца ПЭМП, изготовленного на базе серийного асинхронного двигателя, с учетом реальных линейных размеров активной зоны: наружный диаметр статора – 140 мм; внутренний диаметр статора – 88 мм; наружный диаметр ротора – 85 мм; длина активной части – 75 мм. Конкретный набор исходных данных расчета (значений тока фазы статора при соответствующих скольжениях) зависит от параметров вторичного контура и определялся экспериментально для каждого конструктивного варианта ротора.

Для расчетов использовался ПК на базе 4-х ядерного процессора AMD Phenom II X4 955, работающего на частоте 3,2 ГГц. Данный процессор показал высокие результаты по итогам тестирования на про-

изводительность при работе с пакетами трёхмерного моделирования [3]. При объеме оперативной памяти – 4 Гб время расчета модели составило 4 часа.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При анализе электромагнитных полей с применением трёхмерных конечно-элементных моделей существенно возрастают требования к точности решения. На первом этапе исследований выполнялось трехмерное моделирование распределения ВТ в сплошном ферромагнитном роторе. Затем сопоставлялись расчетные картины плотности ВТ в поперечном сечении с соответствующими картинами, полученными другими авторами при решении двухмерных полевых задач для машин со сплошным ферромагнитным ротором. На рис. 1 представлена картина мгновенного распределения z -компоненты (осевой составляющей) плотности ВТ в поперечном сечении сплошного ферромагнитного ротора при $s = 0,1$. Программный комплекс Comsol Multiphysics предоставляет широкие возможности анализа полученных результатов на основе универсальных способов визуализации решения трехмерных задач. В частности, на рис. 2 представлена пространственная картина распределения плотности ВТ в виде поперечного среза (выполненного посередине длины сплошного ротора) совместно с линиями тока. В случае отображения плотности ВТ в виде линий тока, последние будут совпадать с классическими "контурами" ВТ. Справа на этом же рисунке отдельно показаны линии тока, цвет которых соответствует определенному значению полной плотности ВТ.

В целом полученный характер распределения плотности ВТ в поперечном сечении сплошного ротора качественно и количественно соответствует результатам расчетов двухмерных моделей [4-6].

Учитывая большое разнообразие всевозможных конструктивных вариантов ППР, в дальнейшем изложении ограничимся представлением некоторых результатов исследования, полученных при решении трехмерной полевой задачи для ПЭМП с гладким и перфорированным ротором. На рис. 3, 4 представлены картины мгновенного распределения плотности ВТ в поверхностном слое соответственно гладкого и перфорированного полого ротора при $s = 0,2$. Представленный ППР имеет 20 прямых рядов по 5 отверстий, диаметром 7 мм. Размер векторов на рисунках пропорционален величине полной плотности ВТ, а его z -компонента определяется в соответствии с оттенком цветовой заливки на поверхности ротора.

Отметим основные особенности распределения ВТ в перфорированном ферромагнитном роторе.

© Заблодский Н.Н., Грицюк В.Ю., Кулдыраев И.Н.

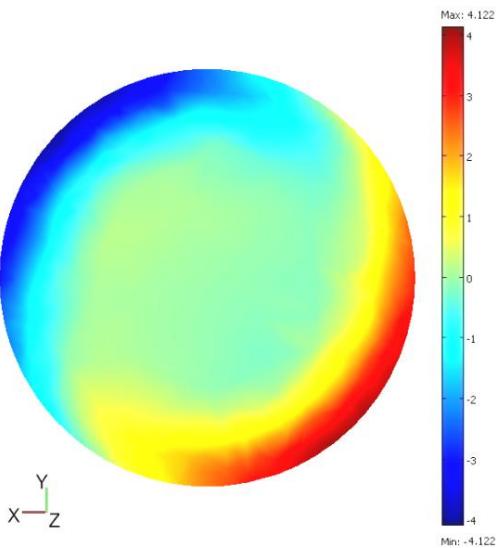


Рис. 1. Картина распределения z -компоненты плотности ВТ ($\text{А}/\text{мм}^2$) в поперечном сечении сплошного ферромагнитного ротора при $s = 0,1$

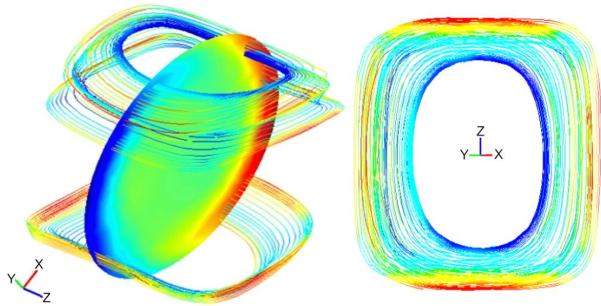


Рис. 2. Распределение z -компоненты плотности ВТ в виде среза в поперечном сечении совместно с линиями тока (слева) и фрагментом линий тока (справа)

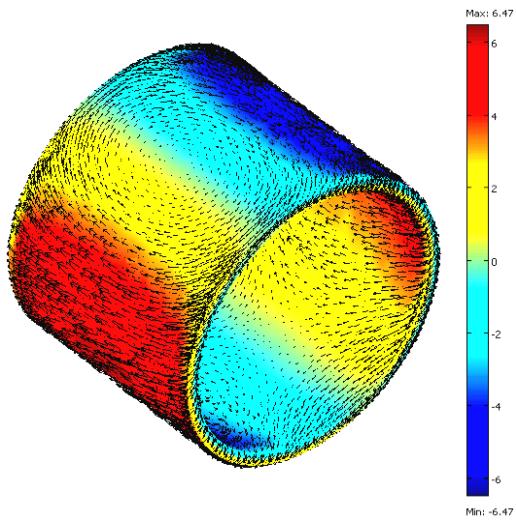


Рис. 3. Картина распределения плотности ВТ ($\text{А}/\text{мм}^2$) в полом гладком роторе

В данном режиме частота тока в роторе составляет 10 Гц, при этом в пределах одного полюсного деления максимум полной плотности ВТ составил $10,05 \text{ А}/\text{мм}^2$, а минимум $0,07 \text{ А}/\text{мм}^2$ на внешней и внутренней поверхностях полого ротора соответственно. За исключением "краевых" участков ротора, где преобладает поперечная составляющая ВТ, а также участков "входа" магнитного потока в ротор, ВТ имеет преимущественно аксиальное направление.

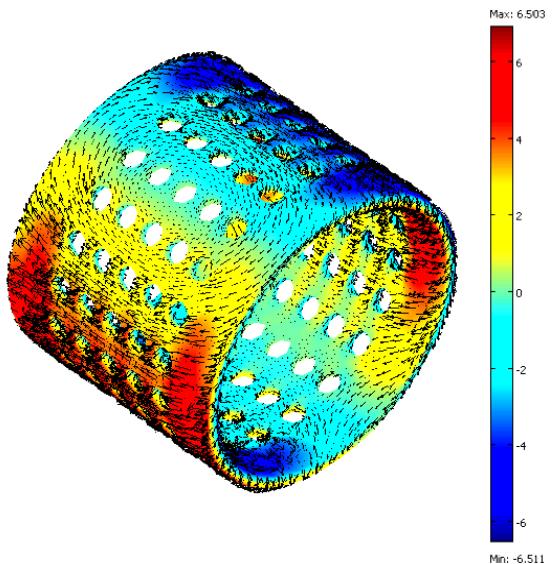


Рис. 4. Картина распределения плотности ВТ ($\text{А}/\text{мм}^2$) в полом перфорированном роторе (П-20-5-7)

Полученная картина токораспределения сочетает в себе контуры ВТ в виде эллипсов, а также контуры в виде прямоугольников с закругленными углами. Такое распределение является промежуточным по отношению к двум предельным случаям, рассмотренным в [7], при малой и большой частоте тока в полом роторе. Действительно, для рассматриваемого случая, выражение, определяющее характер распределения ВТ в роторе имеет вид:

$$\frac{\Delta}{\delta} \mu_0 \gamma \omega \approx (\pi / \tau)^2, \quad (1)$$

где Δ – толщина ротора; δ – эквивалентный воздушный зазор; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; γ – удельная электрическая проводимость материала ротора; ω – частота тока в роторе; τ – полюсное деление.

Также наблюдаются контуры, которые через торцы замыкаются по внутренней поверхности полого цилиндра, и практически не имеют поперечной составляющей ВТ. Величина плотности ВТ в середине активной длины ротора, непосредственно под "полюсами" стремится к нулю.

Поперечный краевой эффект проявляется слабо. Это обусловлено малой частотой ВТ, при которой его вытеснение к "краевым" участкам ротора незначительно. Расчеты, проведенные для ППР, показали, что с ростом скольжения картина токораспределения меняется, происходит вытеснение тока к краям цилиндра. Распределение полной плотности ВТ по длине ротора (вдоль аксиальной линии, проходящей по середине полюса) для различных значений скольжения показано на рис. 5. Такой характер распределения ВТ по длине ротора хорошо согласуется с картинами распределения тока, полученными расчетным путем в [8] для полого ротора в предположении, что плотность ВТ по толщине цилиндра и радиальная составляющая напряженности магнитного поля не изменяются.

Рассмотрим более детально картину распределения z -компоненты плотности ВТ в поперечном сечении ППР, проходящем посередине его активной длины при $s = 0,2$ (рис. 6). На рисунке видно, что составляющая ВТ, перпендикулярная плоскости рисунка протекает в двух противоположных направлениях, образуя тем самым контуры протекания тока. При этом наблюдаются участки ротора, где на его поверхности протекают токи одного направления, а на неко-

торой глубине протекают затухающие токи, направленные противоположно. Это же подтверждается присутствием экстремумов на графике распределения полной плотности ВТ по глубине ротора (рис. 7), который построен вдоль радиальной линии, проходящей через точку "max 1". Точки "max 1" и "max 2", отмеченные на рис. 6, – точки на наружной поверхности ротора в которых z -компоненты плотности ВТ достигает максимального значения.

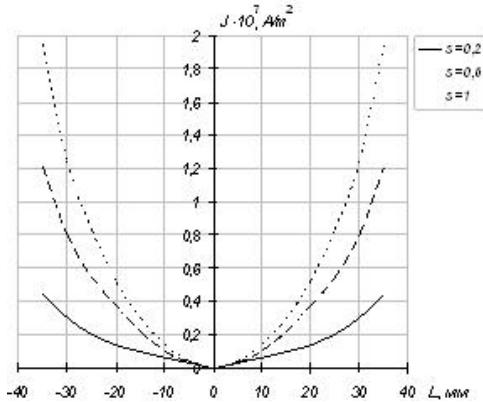


Рис. 5. Распределение полной плотности ВТ по длине ППР при $s = 0,2; 0,6; 1$

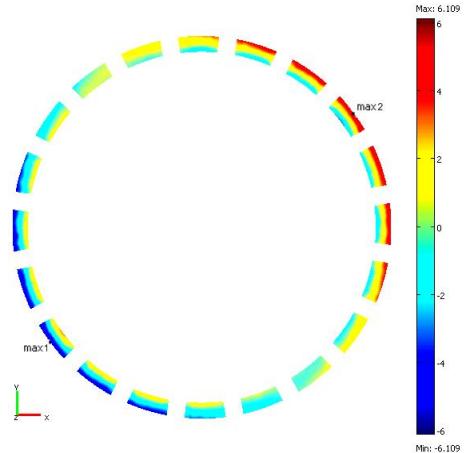


Рис. 6. Картина распределения z -компоненты плотности ВТ ($\text{А}/\text{мм}^2$) в поперечном сечении ППР при $s = 0,2$

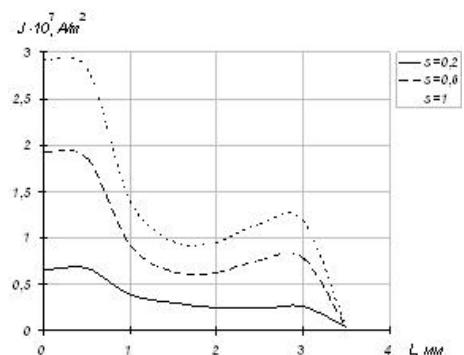


Рис. 7. Распределение полной плотности ВТ по глубине ППР при $s = 0,2; 0,6; 1$

Постпроцессорная функция Subdomain Integration вышеупомянутого программного комплекса позволяет выполнять количественную оценку для отдельных пространственных составляющих по различным физическим величинам. В табл. 1 приведены соотношения z -компоненты и полной плотности ВТ, полученные для некоторых конструктивных вариантов роторов ПЭМП.

Для удобства использованы краткие обозначения конструктивных вариантов ППР. Например, обозначению П-20-3-4, соответствует ротор, имеющий 20 прямых рядов по 3 отверстия диаметром 4 мм.

Расчеты, проведенные при $s = 0,2$ показали, что расхождение соотношений J_z / J_{Σ} для различных схем перфорации ротора находится в пределах расчетной погрешности, что не дает права утверждать о непосредственном влиянии типа схемы перфорации ротора на интегральное перераспределение пространственных составляющих плотности тока и, соответственно, активное сопротивление ротора.

На рис. 8 представлена зависимость активного волнового сопротивления сплошного ферромагнитного ротора от скольжения.

Таблица 1

Конструктивное исполнение ротора	J_z / J_{Σ}
Без отверстий	0,661
П-8-7-4	0,682
П-20-3-4	0,670
П-20-5-7	0,679
С-20-5-4	0,683
Ш-40-4-5	0,659

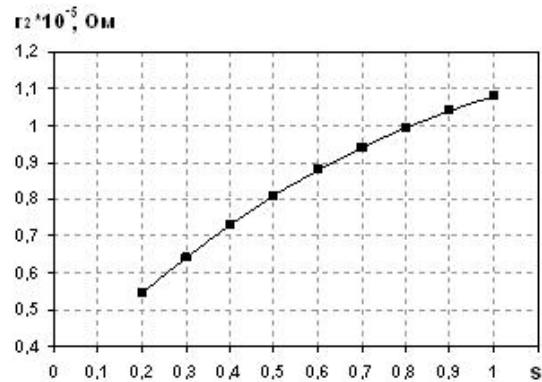


Рис. 8. Зависимость $r_e = f(s)$ для сплошного ферромагнитного ротора

Значения сопротивления для различных значений скольжения (выраженного через частоту токов в пазах статора) получены по результатам решения уравнений квазистационарного электромагнитного поля, исходя из величины мощности резистивных потерь Q_r и квадрата полного тока ротора I_{Σ} :

$$r_e = \frac{Q_r}{I_{\Sigma}^2} = \frac{\int_V \left(\frac{J_{\Sigma}^2}{\gamma} \right) dV}{\left(\int_V J_{\Sigma} dV / l_a \right)^2}, \quad (2)$$

где J_{Σ} – полная плотность ВТ ротора; l_a – активная длина ротора.

Результаты расчета зависимости $r_e = f(s)$ для сплошного ротора показали хорошее согласование с ранее установленными зависимостями [9, 10]. По мере разгона асинхронного двигателя со сплошным ферромагнитным ротором, частота переменного магнитного потока в роторе уменьшается, а толщина слоя, в котором протекают ВТ, увеличивается. При этом величина активного сопротивления уменьшается практически пропорционально \sqrt{s} .

Зависимости $r_e = f(s)$ для полых ферромагнитных роторов с различной толщиной стенки представлены на рис. 9. Из полученных результатов следует, что

при толщине стенки цилиндра 10 мм активное волновое сопротивление ротора на участке $s = 1 \dots 0,7$ не значительно превышает сопротивление сплошного ротора. При дальнейшем увеличении скорости сопротивление полого ротора снижается менее интенсивно, что связано с невозможностью дальнейшего увеличения токопроводящего слоя. В результате, зависимость $r_e = f(s)$ приобретает почти линейный характер.

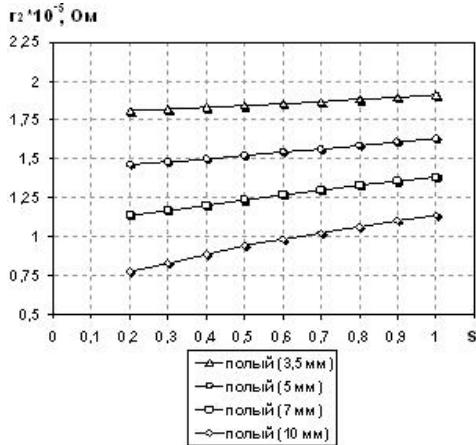


Рис. 9. Зависимости $r_e = f(s)$ для полых ферромагнитных роторов

С уменьшением толщины стенки ротора соответствующая зависимость $r_e = f(s)$ проходит выше и становится более пологой. Так, активное волновое сопротивление полого ротора с толщиной стенки 3,5 мм, мало зависит от скольжения и, при $s = 1$ в 1,75 раза превышает активное сопротивление сплошного ротора. В этом случае, толщина слоя в котором протекают ВТ, равна толщине стенки цилиндра практически во всем диапазоне изменения скольжения. При пуске частота ВТ в роторе составляет 50 Гц, а глубина проникновения тока в тело ротора – 2...3 мм, что на первый взгляд должно обуславливать равенство значений r_e для полого и сплошного роторов при $s = 1$. Однако сопротивление ротора резко увеличивается при малых торцевых поверхностях, что особенно скаживается в роторе без дна [8].

На рис. 10 представлены зависимости $r_e = f(s)$ для ППР с толщиной стенки 3,5 мм. Введение перфораций ротора приводит к перемещению зависимости $r_e = f(s)$ параллельно вверх. При этом основное влияние на величину активного сопротивления оказывает коэффициент перфорации ротора k_{nepf} – отношение суммарной площади перфораций к площади наружной поверхности аналогичного гладкого ротора. Из рис. 10 видно, что зависимости $r_e = f(s)$ для роторов с прямыми рядами, одинаковым диаметром отверстий, но различным количеством рядов и числом отверстий в ряду, проходят параллельно одна другой. При этом значения k_{nepf} практически равны (0,035 и 0,037), а разница в сравнении с сопротивлением гладкого ротора составляет $\approx 3 \dots 4\%$. На этом же рисунке представлена зависимость $r_e = f(s)$ для ротора, имеющего скос рядов отверстий $\alpha = 30^\circ$ и $k_{nepf} = 0,063$. В данном случае превышение сопротивления по сравнению с гладким ротором составляет $\approx 7 \dots 9\%$. На рис. 11 представлены зависимости $r_e = f(s)$ для ротора с прямыми рядами и ротора с шахматным расположением отверстий, имеющих повышенный $k_{nepf} = 0,192$ и 0,157 соответственно.

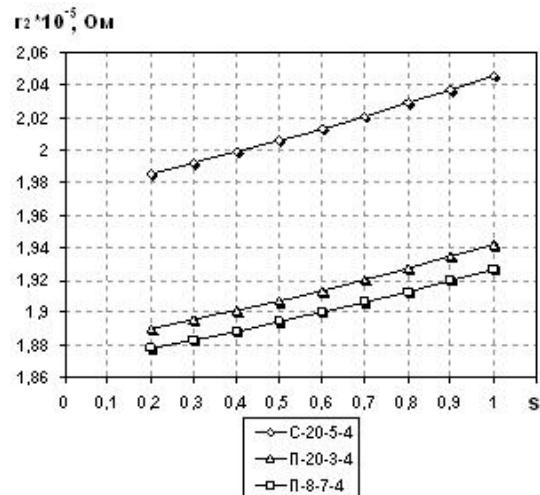


Рис. 10. Зависимости $r_e = f(s)$ для ППР

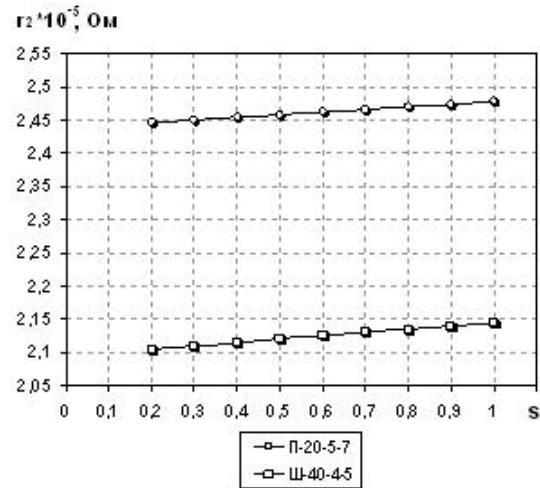


Рис. 11. Зависимости $r_e = f(s)$ для ППР с повышенным k_{nepf}

Полагаясь на анализ полученных зависимостей, для расчета активного волнового сопротивления ППР может быть рекомендовано следующее выражение:

$$r_{en} = r_{e2} \cdot (1 - k_{nepf})^{-1}, \quad (3)$$

где r_{e2} – активное волновое сопротивление полого гладкого ротора; k_{nepf} – коэффициент перфорации ротора.

Активное сопротивление полого ферромагнитного (гладкого) ротора с хорошей точностью определяется по выражению, приведенному в [7]. Формула (3) дает удовлетворительные результаты (расхождение с полученными зависимостями до 4 %) для различных типов схем перфорации с равномерным расположением отверстий в диапазоне изменения $k_{nepf} = 0,02 \dots 0,4$.

Непосредственное влияние типа схемы перфорации ротора на активное сопротивление ротора проявляется при явно неравномерном расположении отверстий и затрудняет использование формулы (3). Например, выполнение отверстий диаметром 5 мм двумя плотными кольцевыми рядами (по 32 отверстия) на расстоянии 10 мм от краев полого цилиндра приводит к снижению соотношения J_Z / J_Σ до значения 0,58. Увеличение активного сопротивления по сравнению с полым гладким ротором составляет 15 %, а по сравнению с ППР, имеющим такой же коэффициент перфорации (С-20-5-4) – 6 %. Зависимость $r_e = f(s)$ для данного конструктивного варианта ППР представлена на рис. 12.

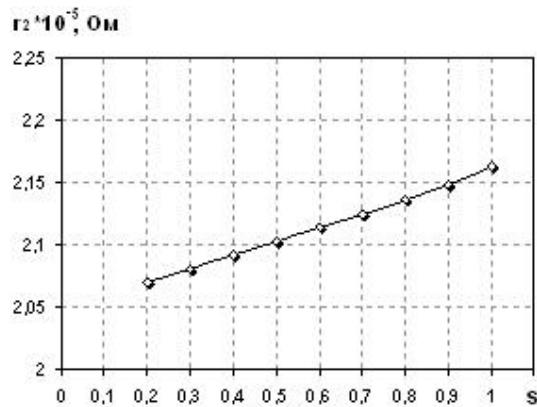


Рис. 12 Зависимость $r_e = f(s)$ для случая расположения отверстий в "краевых" зонах ротора

ВЫВОДЫ

Предложен подход к анализу распределения вихревых токов в полом перфорированном роторе, а также к определению его активного волнового сопротивления на базе трехмерной математической модели полифункционального электромеханического преобразователя энергии. Модель учитывает все особенности геометрии перфорированного ротора, влияние краевого эффекта, а также эффекта вытеснения тока.

В результате проведенных численных исследований получены законы пространственного распределения плотности тока в полом перфорированном роторе в виде картин и зависимостей.

Установлены зависимости активного волнового сопротивления от скольжения для полого гладкого и перфорированного ротора при различных значениях конструктивных параметров. Предложено выражение для определения активного волнового сопротивления полого перфорированного ротора.

Рассмотренная конечно-элементная модель может быть использована при анализе электромагнитных полей в электромеханических преобразователях со сложной вторичной частью. Это позволит учесть реальный трехмерный характер поля (вызванный особенностями конструкции и конечными осевыми размерами) и, соответственно, получить более адекватную расчетную информацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заблодский Н.Н. Численное моделирование электромагнитных полей в полифункциональных электромеханических преобразователях с полым перфорированным ротором / Н.Н. Заблодский, М.А. Филатов, В.Ю. Грицюк // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 1. – С. 25-27.
2. Грицюк В.Ю. Исследование механических характеристик полифункциональных электромеханических преобразователей с полым перфорированным ротором / В.Ю. Грицюк // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2012. – Вып. 37. – С. 338-352.
3. Платформа ПК: Процессоры [электронный ресурс] / Дмитрий Лаптев // Проект iXBT.com – Режим доступа к источнику: <http://www.ixbt.com/cpu/amd-phenom-2-x4-940.shtml>.
4. Кручинина И.Ю. Поисковые исследования характеристик и свойств специальных типов асинхронных машин с массивным ротором на основе наноматериалов: дис. канд. техн. наук: спец. 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты" / Кручинина Ирина Юрьевна. – Санкт-Петербург, 2006. – 118 с.

5. Тейн Наинг Тун. Применение полевых методов в электромагнитных расчетах электрических машин: диссертация кандидата технических наук: 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты" / Тейн Наинг Тун. – Москва, 2010. – 150 с.

6. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електрических машин / Юрій Миколайович Васьковський – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 191 с.

7. Лопухина Е.М. Асинхронные микромашины с полым ротором / Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. – М.: Энергия, 1967. – 488 с.

8. Вевюрко И.А. Расчет характеристики двухфазной индукционной машины с учетом токораспределения в роторе / И.А. Вевюрко // Вестник электропромышленности. – 1957. – № 6. – С. 34-39.

9. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы в электрических машинах / Постников И.М. – М.: Высшая школа, 1975. – 319 с.

10. Куцевалов В.И. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами / Куцевалов В.И. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 302 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zablodskij N.N. Chislennoe modelirovaniye elektromagnitnyh polej v polifunktional'nyh elektromehanicheskikh preobrazovatelyah s polyim perforirovannym rotorom / N.N. Zablodskij, M.A. Filatov, V.Yu. Gricyuk // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2012. - № 1. - S. 25-27. 2. Gricyuk V.Yu. Issledovanie mehanicheskikh harakteristik polifunktional'nyh elektromehanicheskikh preobrazovatelej s polyim perforirovannym rotorom / V.Yu. Gricyuk // Sb. nauch. tr. DonGTU. - Alchevsk: DonGTU. - 2012. - Vyp. 37. - S. 338-352. 3. Platforma: Processory [elektronnyj resurs] / Dmitrij Laptev // Proekt iXBT.com - Rezhim dostupa k istochniku: <http://www.ixbt.com/cpu/amd-phenom-2-x4-940.shtml>. 4. Kruchinina I.Yu. Poiskovye issledovaniya harakteristik v svoystv special'nyh tipov asynchronnyh mashin s massivnym rotorom na osnove nanomaterialov: dis. kand. tehn. nauk: spec. 05.09.01 "Elektromehanika i elektricheskie apparaty" / Kruchinina Irina Yur'evna. - Sankt-Peterburg, 2006. - 118 s. 5. Tejn Naing Tun. Primenie polevyh metodov v elektromagnitnyh raschetah elektricheskikh mashin: dissertaciya kandidata tehnicheskikh nauk: 05.09.01 "Elektromehanika i elektricheskie apparaty" / Tejn Naing Tun. - Moskva, 2010. - 150 s. 6. Vaskovskij Yu.M. Pol'ovij analiz elektrichnih mashin / Jurij Mikolajovich Vas'kovskij - K.: NTUU "KPI", 2007. - 191 s. 7. Lopuhina E.M. Asinhronye mikromashiny s polyim rotorom / Lopuhina E.M., Somikhina G.S. - M.: 'Energiya, 1967. - 488 s. 8. Vevyurko I.A. Raschet harakteristik dvuhfaznoj indukcionnoj mashiny s uchetom tokoraspredeleniya v rotore / I.A. Vevyurko // Vestnik elektro promyshlennosti. - 1957. - № 6. - S. 34-39. 9. Postnikov I.M. Obobschennaya teoriya i perehodnye processy v elektricheskikh mashinah / Postnikov I.M. - M.: Vysshaya shkola, 1975. - 319 s. 10. Kucevalov V.I. Voprosy teorii i rascheta asinhronnyh mashin s massivnymi rotorami / Kucevalov V.I. - M. - L.: 'Energiya, 1966. - 302 s.

Поступила 24.10.2012

Заблодский Николай Николаевич, д.т.н., проф.,
Грицуц Владимир Юрьевич,

Кулдыркаев Илья Николаевич

Донбасский государственный технический университет

кафедра "Электрические машины и аппараты"

94204, Луганская обл., Алчевск, пр. Ленина, 16

тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87

e-mail: info@dgmi.edu.ua

Zablodskiy N.N., Gritsyuk V.Yu., Kuldyrkaev I.N.

Features of eddy current distribution in a hollow perforated rotor of a polyfunctional electromechanical converter.

Laws of spatial current density distribution in a hollow perforated rotor are obtained in the form of images and dependencies. Behavior of wave resistance subject to rotor slip is identified for a hollow smooth and perforated rotor of various design parameters. An expression for the hollow perforated rotor wave resistance determination is introduced.

Key words – polyfunctional electromechanical converter, perforated rotor, eddy current distribution, wave resistance behavior.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ШЕСТИФАЗНОЮ ОБМОТКОЮ

Приведені особливості електромагнітного розрахунку трифазних асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою в статорі, а також експериментальні дані конвеєрного двигуна з двома шестифазними обмотками.

Описаны особенности электромагнитных расчетов трехфазных асинхронных двигателей с шестифазной обмоткой в статоре, а также приведены экспериментальные данные конвейерного двигателя с двумя шестифазными обмотками.

Актуальність проблеми. Асинхронні двигуни складають 90 % всіх електродвигунів та споживають більше половини всієї електроенергії. Тому навіть незначне покращення асинхронних двигунів може мати значний економічний ефект.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. В [1] розглянута обмотка шестифазного струму, яка складається з двох окремих обмоток трифазного струму. Обмотки зміщені взаємно на 1/6 полюсного ділення, а струми в них зсунуті по фазі на 1/12 періоду. Фази цих обмоток займають не 1/3 полюсного ділення, а тільки 1/6, тобто є більш зосередженими; в результаті коефіцієнти розподілу цих обмоток для основної гармоніки надзвичайно високі, що є немаловажним достоїнством. Але ще важливішим є те, що в кривій МРС шестифазної обмотки повністю зникають п'ята та сьома гармоніки. Однак такі обмотки можуть застосовуватись дуже обмежено, тільки там, де поряд з розміщений синхронний генератор з шестифазною обмоткою [2].

В [3] показано, що можна створити ефективну шестифазну обмотку, що живиться трифазною напругою. Для цього фази однієї частини обмотки з'єднують зіркою, фази іншої частини обмотки – трикутником, при цьому фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

Мета роботи – подати основи електромагнітного розрахунку шестифазної обмотки трифазного струму.

Матеріал і результати дослідження. Електромагнітний розрахунок асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою в статорі має свої особливості.

На рис. 1 показана 6-фазна обмотка, що живиться трифазним струмом від трифазної мережі. Оскільки кожна фаза 6-фазної обмотки займає в два рази менше числа пазів на полюс і фазу порівняно з фазою трифазної обмотки

$$q' = \frac{Z}{12p}, \quad (1)$$

то коефіцієнт розподілу для 6-фазної обмотки

$$k_p^{m=6} = \frac{\sin \frac{Z}{12p} \cdot \frac{\alpha}{2}}{\frac{Z}{12p} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (2)$$

де α – кут для основної гармоніки в електричних градусах між поряд розміщеними пазами

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot p}{Z}.$$

Коефіцієнт скорочення і обмотковий коефіцієнт вираховуються як і для трифазної обмотки.

Для шестифазної обмотки на рис. 1, використовуючи (2)

$$k_p^{m=6} = 1.$$

Для трифазної обмотки, розміщеної в тих же пазах

$$k_p^{m=3} = 0,965926.$$

Завдяки шестифазності обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці збільшується на 3,4 %.

Обмотки, що складають 6-фазну обмотку, можуть бути з'єднані між собою паралельно (рис. 1) і послідовно (рис. 2). У будь-якому випадку обидві складові 6-фазної обмотки утворюють спільній магнітний потік Φ . В подальшому складові 6-фазної обмотки будемо називати так: фаза обмотки, що з'єднана зіркою, і фаза обмотки, що з'єднана в трикутник.

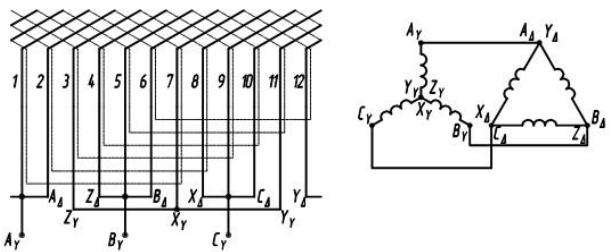


Рис. 1. Паралельне з'єднання складових 6-фазної обмотки

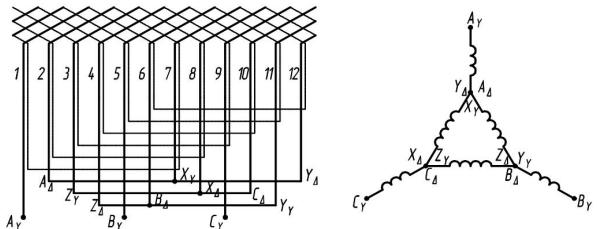


Рис. 2. Послідовне з'єднання складових 6-фазної обмотки

Попереднє значення величини магнітного потоку вираховується, як і в звичайних трифазних машинах, виходячи з оптимальної для даної машини величини індукції в повітряному зазорі

$$\Phi = B_\delta \cdot \frac{D \cdot l_\delta}{p},$$

де D – внутрішній діаметр статора; l_δ – активна довжина магнітопроводу статора.

При паралельному з'єднанні обмоток (рис. 1) попереднє число витків фази обмотки, що з'єднана трикутником

$$W'_\Delta = \frac{k_E \cdot U_1}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot k_{ob}}, \quad (3)$$

де U_1 – лінійна напруга мережі.

Попереднє число витків 6-фазної обмотки, з'єднаної зіркою

$$W'_Y = \frac{k_E \cdot U_1}{4,44 \cdot f \cdot \sqrt{3} \cdot \Phi \cdot k_{ob}}. \quad (4)$$

Для двошарової 6-фазної обмотки, з'єднаної зіркою

$$W'_Y = \frac{2p}{a} \cdot \frac{Z}{12p} \cdot W'_{KY} = \frac{Z}{6a} \cdot W'_{KY}, \quad (5)$$

звідки:

$$W'_{KY} = \frac{W'_Y \cdot 6a}{Z}, \quad (6)$$

де W'_{KY} – число витків катушки; a – число паралельних гілок у фазі.

Заокруглюємо W'_{KY} до цілого числа W_{KY} і вираховуємо остаточне значення числа витків W_Y фази обмотки, що з'єднана зіркою, використовуючи формулу (5).

Вираховуємо число витків катушки фази, з'єднаної в трикутник, і заокруглюємо до цілого числа

$$W_{k\Delta} = \sqrt{3} \cdot W_{KY}. \quad (7)$$

Остаточне значення числа витків фази обмотки, з'єднаної в трикутник, вираховуємо за тією ж формулою (5), що і для зірки.

Використовуючи формулі (3) або (4), в які підставляємо остаточні значення чисел витків фази W_Δ або W_Y , одержуємо уточнене значення магнітного потоку Φ .

При паралельному з'єднанні обмоток (рис. 1) рівність (7) повинна дотримуватись із майже 100% точністю. Цим вимогам відповідає обмежена кількість варіантів: $W_{KY} = 4$ і $W_{k\Delta} = 7$; $W_{KY} = 7$ і $W_{k\Delta} = 12$ – різниця 1%; $W_{KY} = 11$ і $W_{k\Delta} = 19$ – різниця 0,26%; $W_{KY} = 15$ і $W_{k\Delta} = 25$ – різниця 0,076%. При подальшому збільшенні W_K кількість варіантів швидко зростає, тобто із зменшенням потужності двигуна легше здійснити паралельне з'єднання двох складових шестифазної обмотки.

При розходженні між W_{KY} і $\sqrt{3} \cdot W_{KY} = W_{k\Delta}$ в контурі, утвореному двома фазами обмотки, з'єднаної зіркою, і фазою трикутника, наприклад $A_Y X_Y B_A A_A$ (рис. 1), або двома фазами зірки та двома фазами трикутника $A_Y X_Y B_A X_A A_A$, виникають зрівняльні струми, обумовлені різницевою ЕРС, що утворюється при $W_{k\Delta} \neq \sqrt{3} \cdot W_{KY}$.

Різницеву ЕРС вираховуємо, як геометричну суму ЕРС активних провідників обмотки, що входять в досліджуваний контур, з допомогою комплексних чисел [4].

Для прикладу розглянемо контур $A_Y X_Y B_A A_A$ (рис. 1). Пази, в яких розміщені провідники, що при обході контуру направлені знизу вгору, позначаємо n ,

пази, в яких лежать провідники, що при обході направлені зверху вниз – k . Тут потрібно додатково враховувати, що числа активних провідників в пазах б-фазної обмотки не одинакові, в пазах обмотки, з'єднаної зіркою – W_{KY} , в пазах обмотки, з'єднаної в трикутник – $W_{k\Delta}$.

Тому

$$\begin{aligned} n &= 1_Y, 10_Y, 11_Y, 12_Y, 5_\Delta, 6_\Delta; \\ k &= 4_Y, 5_Y, 6_Y, 7_Y, 11_\Delta, 12_\Delta. \\ A_{(n,k)} &= \sum_{i=1}^{i=10,11,12} W_{kY} \cdot \cos(n_i \alpha) - \sum_{i=4}^{i=5,6,7} W_{kY} \cdot \cos(k_i \alpha) + \\ &+ \sum_{i=5}^{i=6} W_{k\Delta} \cdot \cos(n_i \alpha) - \sum_{i=11}^{i=12} W_{k\Delta} \cdot \cos(k_i \alpha); \\ B_{(n,k)} &= \sum_{i=1}^{i=10,11,12} W_{kY} \cdot \sin(n_i \alpha) - \sum_{i=4}^{i=5,6,7} W_{kY} \cdot \sin(k_i \alpha) + \\ &+ \sum_{i=5}^{i=6} W_{k\Delta} \cdot \sin(n_i \alpha) - \sum_{i=11}^{i=12} W_{k\Delta} \cdot \sin(k_i \alpha). \end{aligned} \quad (8)$$

Величина різницевої ЕРС у відносних одиницях в комплексній формі

$$\dot{E}_{(n,k)}^* = \operatorname{Re}[A_{(n,k)}] + \operatorname{Im}[B_{(n,k)}]. \quad (9)$$

Модуль різницевої ЕРС у відносних одиницях

$$E_{(n,k)}^* = \sqrt{A_{(n,k)}^2 + B_{(n,k)}^2}. \quad (10)$$

Різницева ЕРС

$$E_{(n,k)} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot E_{(n,k)}^*. \quad (11)$$

При $W_{k\Delta} = \sqrt{3} \cdot W_{KY}$ різницева ЕРС $E_{(n,k)} = 0$.

Більш прийнятне послідовне з'єднання складових 6-фазної обмотки (рис. 2). При дотриманні точно-го співвідношення $W_{k\Delta} = \sqrt{3} \cdot W_{KY}$ напруга між двома складовими 6-фазної обмотки розподіляється порівну. Визначаємо значення числа витків обмотки, з'єднаної в трикутник

$$W'_\Delta = \frac{k_E \cdot U_1}{2 \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot k_{ob}}.$$

Знаходимо число витків катушки $W'_{k\Delta}$, заокруглюємо до цілого числа $W_{k\Delta}$ та вираховуємо число витків катушки фази, з'єднаної в зірку, також заокруглюючи до цілого числа

$$W_{KY} = \frac{W_{k\Delta}}{\sqrt{3}}.$$

Використовуючи формулу (5), знаходимо остаточні значення чисел витків складових фаз 6-фазної обмотки.

Уточнене значення магнітного потоку знаходимо, використовуючи обмотку, з'єднану в трикутник

$$\Phi = \frac{k_B \cdot U_1 \cdot K}{2 \cdot 4,44 \cdot f \cdot W_\Delta \cdot k_{ob}}, \quad (12)$$

де

$$K = \frac{W}{W_Y \cdot \sqrt{3}} + 1 \quad (13)$$

Сума лінійних напруг обмотки, з'єднаної трикутником, і обмотки, з'єднаної зіркою, повинна дорівнювати лінійній напрузі мережі

$$U_1 = \frac{1}{k_E} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot k_{ob} \cdot (W_\Delta + W_Y \cdot \sqrt{3}).$$

Провідники обмотки, з'єднаної в трикутник, мають в $\sqrt{3}$ раз менший поперечний переріз, в результаті вага мідного проводу обох обмоток однакова. Опір фази обмотки, з'єднаної в трикутник, в 3 рази більший опору фази, що з'єднана зіркою, але втрати в міді обох обмоток однакові, тому що в обмотці, що з'єднана зіркою, протікає лінійний струм, а в обмотці, з'єднаній в трикутник – фазний струм.

Для підтвердження переваг шестифазної обмотки над трифазною було зроблено дослідний зразок конвеєрного двигуна для гірничорудної промисловості, що має дві обмотки на статорі числом полюсів $2p_1=12$ і $2p_2=4$ потужністю відповідно $P_2=85$ кВт і $P_2=250$ кВт, число пазів $Z_1=72$ і $Z_2=56$. Експериментальні дані конвеєрного двигуна з двома шестифазними обмотками у порівнянні з серійним двигуном представліні у табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальні дані

Двигун	$2p$	P_2 , кВт	M_n , Нм	l_δ , мм	B_δ , Тл	M_n , Нм
Базовий	12	85	1667	445	0,86	3100
	4	250	1604	445	0,8	3171
Новий	12	100	1965	530	0,88	4520
	4	300	1929	530	0,7	2959
Двигун	$2p$	M_n^*	M_{kp} , Нм	M_{kp}^*	M_{min} , Нм	M_{min}^*
Базовий	12	1,86	1495	0,90	1060	0,64
	4	1,98	3154	1,97	1700	1,06
Новий	12	2,30	2159	1,10	1650	0,84
	4	1,53	3560	1,85	1985	1,03

При майже однакових індукціях в 12-полюсному варіанті кратність пускового моменту збільшилась на 24%, максимального – на 22 %, мінімального – на 31 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Жерве Г.К. Обмотки електрических машин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. 1989. – 400 с.: ил.
- Электрооборудование тепловозов: Справочник / В.С. Марченко, А.А. Сергеев, В.Т. Иванченко и др. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2003. – 248 с.: ил.
- Лущик В.Д. Шестифазна обмотка асинхронних двигунів // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – С. 22-24.
- Лущик В.Д. Універсальна методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №1. – С. 28-30.

Надійшла 18.09.2012

Лущик В'ячеслав Данилович, д.т.н., проф.

Полезін Сергій Юрійович

Донбаський державний технічний університет

кафедра електрических машин та апаратів,

94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16,

тел.: (06442) 23123, e-mail: v.d.luschik@yandex.ua

Кирьянов Володимир Валерійович, головний інженер

ВАТ "Донецький електротехнічний завод",

83030, Донецьк, вул. Таллінська, 1,

e-mail: kirianov@detz.dn.ua

Lushchyk V.D., Kiryanov V.V., Polezin S.Yu.

Electromagnetic calculation of three-phase asynchronous motors with a six-phase winding.

Features of electromagnetic computation of three-phase asynchronous motors with a six-phase winding in the stator are described. Experimental data on a conveyor motor with two six-phase windings are given.

Key words – three-phase asynchronous motor, six-phase winding, electromagnetic calculation, experimental data.

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОДЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА МЕТОДОМ КОНФОРМНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

З використанням методу конформних перетворень отримано розрахунковий вираз для визначення напруженості магнітного поля у робочій зоні круглого підйомного електромагніта. Запропонованій вираз дозволяє здійснювати розрахунок поля в будь-якій точці вихідної області в явному вигляді по координатах цієї точки.

С использованием метода конформных преобразований получено расчетное выражение для определения напряженности магнитного поля в рабочей зоне круглого грузоподъемного электромагнита. Предложенное выражение позволяет осуществлять расчет поля в любой точке исходной области в явном виде по координатам этой точки.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании подъемных электромагнитов возникает необходимость количественной оценки интенсивности магнитного поля в рабочей зоне с целью выбора таких параметров, которые позволяют создавать требуемое значение напряженности при минимальных затратах. Эффективным инструментом для быстрой оценки характеристик электромагнитов с необходимой для практических целей точностью служат математические модели, построенные на основе расчета двухмерных магнитных полей с использованием метода конформных преобразований [1-3].

Главное ограничение при использовании метода конформных преобразований состоит в том, что в большинстве задач границы поля должны быть приняты или имеющими бесконечную магнитную проницаемость, или совпадающими с линиями потока, или представляющими собой комбинацию этих двух типов границ [2-4]. Также вводятся некоторые другие принятые в инженерной практике расчетов электромагнитов допущения [5-8]: отсутствие влияния геометрии намагничивающих катушек на распределение поля в рабочей области; бесконечно малая толщина полюсных наконечников электромагнитных систем.

Целью данной статьи является получение аналитического выражения, с помощью которого может быть выполнен расчет напряженности магнитного поля в рабочей зоне круглого подъемного электромагнита.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

При построении круглых (тороидальных плоских) подъемных электромагнитов широкое применение нашла двухполюсная (или трехполярная) структура. Эскиз такой структуры приведен на рис. 1, где приняты следующие обозначения: d – диаметр центрального полюса (сердечника); δ – межполюсный зазор (равен ширине намагничивающей обмотки); D – диаметр диска; h – высота обмотки намагничивания; h_1 – высота магнитопровода. Для двухполюсной конструкции (рис. 1) можно ввести в рассмотрение следующие критерии геометрического подобия: $D/d=X_1$; $\delta/d=X_2$; $y/d=X_3$, интервалы варьирования которых, представляющие практический интерес и имеющие место в реальных электромагнитных системах, находятся в пределах: $X_1=D/d=3\dots5$; $X_2=\delta/d=0,5\dots1,2$; $X_3=y/d=0,1\dots1,0$.

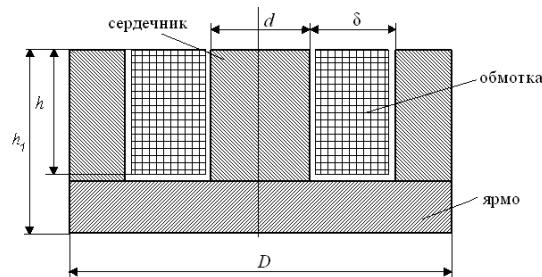


Рис. 1. Эскиз двухполюсной электромагнитной системы круглого подъемного электромагнита

Магнитное поле в рабочей зоне двухполюсной электромагнитной системы круглого подъемного электромагнита (рис. 1) имеет явный трехмерный характер. Поэтому результаты расчета, полученные методом конформных преобразований для двухмерного магнитного поля, должны быть скорректированы соответствующим коэффициентом, учитывающим реальную трехмерность поля.

Расчетная область для двухполюсной структуры согласно рис. 1 будет представлять собой плоскопараллельную систему трех бесконечно длинных экви-потенциальных пластин конечной ширины (рис. 2). Наружные пластины соответствуют наружным полюсам исходной системы, они равнополярны и противоположны полярности центральной пластины (трехполярная система). Разность магнитных потенциалов между ними $2U_0$. Линии воздушного зазора BC и FK (рис. 2) с достаточной степенью точности можно считать силовыми линиями поля [9]. Мнимая ось Oy в исходной плоскости Z (рис. 2), проходящая через середину центрального полюса, с учетом принятого допущения о бесконечной проницаемости стали полюсов, является силовой линией. Отметим также, что для рассматриваемой области (рис. 2) ее половина является зеркально симметричной и представляет собой, как будет показано ниже, новый вариант расчетной области рассматриваемого устройства.

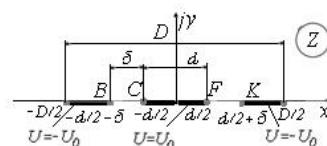


Рис. 2. Математическая модель расчетной области

© Шведчикова И.А.

РАСЧЕТНОЕ ВЫРАЖЕНИЕ

ДЛЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Преобразуем исходную систему пластин-полюсов (рис. 2), произведя масштабное уменьшение ее геометрии делением на размер $d/2$, что позволяет перейти от переменной $Z=x+jy$ к переменной $Z_1=x_1+jy_1$

$$Z_1 = 2 \cdot Z/d. \quad (1)$$

В результате такого масштабирования получается система пластин-полюсов, изображенная на рис. 3,а. Напряженность магнитного поля в системе полюсов-пластин, изображенной на рис. 3,а, связана с напряженностью магнитного поля в системе полюсов, изображенной на рис. 2, соотношением

$$H_Z = H_{Z_1} \frac{dZ_1}{dZ}, \quad (2)$$

что, с учетом (1), позволяет записать

$$H_Z = 2 \cdot H_{Z_1}/d. \quad (3)$$

Далее, принимая во внимание, что половины области Z_1 являются зеркально симметричными, выполним преобразование половины $E_1F_1K_1L_1$ этой области, представляющей собой систему двух пластин разной ширины, на систему двух пластин E_1F_1 и K_1L_1 равной ширины, симметричных относительно вертикальной оси в плоскости t (рис. 3,б), используя преобразование [10],

$$t = p \cdot Z_1^2 / (\sqrt{Z_1^2 + c} - 1/k), \quad (4)$$

где

$$p = \frac{2(1+c)(\alpha+c)}{c(\alpha-1)}, \quad (5)$$

$$c = \frac{-\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \beta\alpha(1-\beta+\alpha)}}{1-\beta+\alpha}, \quad (6)$$

$$\alpha = (D/d)^2 = X_1^2, \quad k = \frac{c(\alpha-1)}{2\alpha+c(\alpha+1)}, \quad (7)$$

$$\beta = (D/d)^2 = X_1^2, \quad \alpha = (1+2\delta/d)^2 = (1+2X_2)^2. \quad (8)$$

При этом вертикальная мнимая ось $0y_1$ в плоскости Z_1 преобразуется на участок $(-1/k; -\infty)$ вещественной оси в плоскости t .

Далее систему двух симметричных пластин отображаем на систему двух противолежащих пластин с однородным полем между ними напряженностью $H_W = 2U_0/\Delta = U_0$ (рис. 3,в). Указанное преобразование осуществляется функцией эллиптического синуса (функция Якоби) [3]

$$T = sn(2K(k) \cdot W, k), \quad (9)$$

содержащем в себе полный эллиптический интеграл первого рода $K(k)$ с модулем k .

Для получения напряженности магнитного поля в области Z необходимо записать следующую цепочку преобразований

$$H_Z = H_W \frac{dW}{dt} \frac{dt}{dz_1} \frac{dz_1}{dz}. \quad (10)$$

С учетом (3), (4) и (9) выражение (10) приводится к виду

$$H_Z = 4cpZ_1U_0 \left(K(k)d(Z_1^2 + c)^2 \sqrt{1-t^2} \sqrt{1-k^2t^2} \right)^{-1}, \quad (11)$$

где связь между координатами $Z_1=x_1+jy_1$ и $t=\xi+j\eta$ определяется помощью выражений (4) – (8).

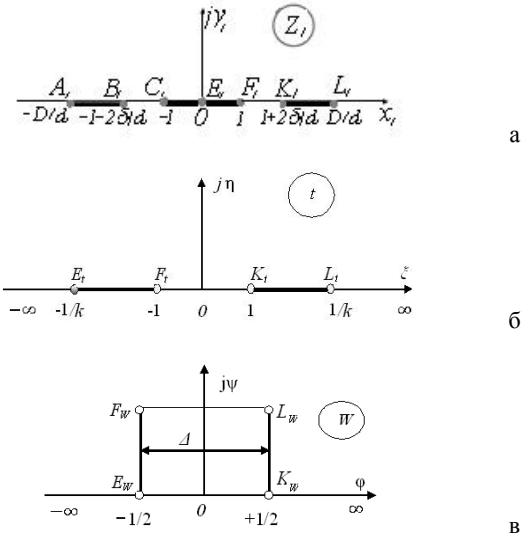


Рис. 3. Этапы конформных отображений исходной области (рис. 2): а) масштабирование; б) преобразование в систему двух симметричных полюсов-пластин; в) отображение на внутренность прямоугольника с однородным полем

Таким образом, получено достаточно простое расчетное выражение для определения напряженности H_Z магнитного поля в исходной плоскопараллельной системе трех пластин-полюсов (рис. 2).

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ПОЛУЧЕННОГО РАСЧЕТНОГО ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ ЕГО ТРЕХМЕРНОСТИ

Расчетное выражение (11) для напряженности H_Z получено при допущении о плоскопараллельности поля. Поэтому, как указывалось выше, результаты расчетов необходимо скорректировать специальным коэффициентом k_δ учитывающим трехмерный характер поля.

В качестве коэффициента трехмерности предлагается использовать отношение напряженностей магнитного поля в одноименных точках, расположенных на оси симметрии кругового витка с током и двухпроводной линии, на расстоянии u до плоскости витка и двухпроводной линии, которое равно [11]

$$k_\delta = \frac{\pi}{2\sqrt{1+(2\frac{y}{D})^2}}. \quad (12)$$

С учетом коэффициента k_δ можно записать уточненное расчетное выражение для напряженности поля $H_{Z\delta}$ в рабочей зоне двухполюсной системы (рис. 2)

$$H_{Z\delta} = \frac{2U_0\pi}{K(k)d} \frac{1}{\sqrt{1+(2\frac{y}{D})^2} \sqrt{1-t^2} \sqrt{1-k^2t^2}} \frac{cpZ_1}{(Z_1^2 + c)^2}. \quad (13)$$

Экспериментальная проверка полученного выражения (13) была выполнена на натурном образце двухполюсного круглого грузоподъемного электромагнита типа ЕМВ-47. В табл. 1 приведены результаты расчетов напряженности поля для двухполюсных структур по формуле (13) для точек, расположенных над серединой центрального полюса, в сравнении с экспериментальными данными.

Таблица 1

Результаты расчета напряженности поля по формуле (13) и оценка погрешности расчетов в сравнении с экспериментальными данными

y_0 , мм	y/d	Напряженность, А/м		Погрешность, %
		по формуле (13)	эксперимент	
50	0,116	158 560	159000	0,27
100	0,23	143 000	135 000	-5,9
150	0,35	121 700	117 000	-4,0
200	0,46	101 830	98 000	-3,9
250	0,58	82 300	88 000	6,5
300	0,7	65 800	61 000	-7,8

Магнитная индукция B измерялась в характерных точках посередине центрального полюса на расстояниях y от его поверхности, равных: 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3 м. Для измерения магнитной индукции использовался измерительный комплекс, состоящий из теслаамперметра Ф4354/1, усилителя постоянного тока Ф115/В-2 и цифрового вольтметра. Такой измерительный комплекс позволял измерять магнитную индукцию в рабочей зоне с основной погрешностью не более $\pm 1,5\%$ [12]. Напряженность поля H в характерных точках рабочей зоны натурного образца определялась по измеренным значениям магнитной индукции B как $H=B/\mu_0$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

Как видно из табл. 1, в диапазоне $y/d=0,11\dots 0,7$ погрешности расчетов с учетом коэффициента k_δ составляют $(-7,8\dots+6,5)\%$, что является приемлемым результатом, т.к. формула (13) не учитывает влияния высоты обмотки намагничивания h и общей высоты магнитопровода h_1 .

ВЫВОДЫ

Расчетное соотношение (13) для двухполюсных структур, учитывающее трехмерность магнитного поля, может быть рекомендовано для предварительных проектных расчетов круглых подъемных электромагнитов. Корректность полученного расчетного выражения подтверждена сравнением результатов расчета с экспериментальными данными для промышленных подъемных электромагнитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загирняк М.В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: Монография / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз, И.А. Шведчикова / Под ред. М.В. Загирняка. – К.: Техника, 2011. – 224 с.
2. Загирняк М.В. Электромагнитные расчеты / М.В. Загирняк. – К.: ИСИО, 1995. – 204 с.
3. M. Zagirnyak, Yu. Branspiz, I. Shvedchikova "Using a conformal mapping method for calculation of a multipolar system magnetic field", Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review), No. 7b, 2012, pp.98-102.
4. Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К.Бинс, П. Лауренсон. – М.: Энергия, 1970. – 376 с.
5. Бранспиз Ю.А. Упрощенный расчет магнитного поля в рабочей зоне Ш-образного электромагнита: Практика применения метода конформного отображения к расчету электротехнических устройств / Ю.А. Бранспиз, Е.Ю. Поляченко. – Луганск: Изд-во ВУГУ, 1999. – 40 с.
6. M.V. Zagirnyak, R.M. Pai, S.A. Nasar, Yu.A. Branspiz "Forces in Pulley-Type Electromagnetic Separators", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 22, No.1, 1985, pp. 63-67.
7. M.R. Smolkin, R.D. Smolkin, E.R. Smolkin "Analysis of Magnetic Fields and Circuits in Separators With Plane-Parallel and Plane-Meridian Symmetry", IEEE Transactions On Magnetics, vol. 44, No. 8, August 2008, pp.1990-2001.

8. E. Matagne, G. Cividyan, V. Kluyskens "Exact Expression of Corner Reluctances in a Magnetic Circuit of Rectangular Section", Computer Field Models of Electromagnetic Devices, 2010, pp. 136-143.

9. Долинский Ю.М. К расчету втяжных электромагнитов / Ю.М. Долинский // Вестник Харьковского политехнического института. – 1968. – № 28 (76). – С. 56-62.

10. R.D. Smolkin, "Calculation of Magnetic Field Strength and Electromagnetic Ponderomotive Force of Separators", IEEE Transactions On Magnetics, vol. 38, No. 3, May 2002, pp.1528-1533.

11. Загирняк М.В. Расчет рациональных параметров круглых подъемных электромагнитов / М.В. Загирняк, Ф.Р. Хабимана, Ю.А. Бранспиз // Вестник Восточноукраинского государственного университета. Серия "Транспорт". – 1996. – С. 250-257.

12. Карташян В.О. Усовершенствованный теслоамперметр А 4354/1 для исследования постоянных магнитных полей / В.О. Карташян, А.П. Нестеренко, М.В. Загирняк // Приборы и техника эксперимента. – 1975. – №1. – С. 239-240.

Bibliography (transliterated): 1. Zagirnyak M.V. Magnitnye separatory. Problemy proektirovaniya: Monografiya / M.V. Zagirnyak, Yu.A. Branspiz, I.A. Shvedchikova / Pod red. M.V. Zagirnyaka. - K.: Tehnika, 2011. - 224 s. 2. Zagirnyak M.V. 'Elektromagnitnye raschety' / M.V. Zagirnyak. - K.: ISIO, 1995. - 204 s. 3. M. Zagirnyak, Yu. Branspiz, I. Shvedchikova "Using a conformal mapping method for calculation of a multipolar system magnetic field", Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review), No. 7b, 2012, pp.98-102. 4. Bins K. Analiz i raschet elektricheskikh i magnitnykh polej / K.Bins, P. Laurenson. - M.: 'Energiya, 1970. - 376 s. 5. Branspiz Yu.A. Uproshchennyj raschet magnitnogo polya v rabochej zone Sh-obraznogo 'elektromagnita: Praktika primeneniya metoda konformnogo otobrazheniya k raschetu 'elektrotehnicheskikh ustrojstv' / Yu.A. Branspiz, E.Yu. Polyachenko. - Lugansk: Izd-vo VUGU, 1999. - 40 c. 6. M.V. Zagirnyak, R.M. Pai, S.A. Nasar, Yu.A. Branspiz "Forces in Pulley-Type Electromagnetic Separators", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 22, No.1, 1985, pp. 63-67. 7. M.R. Smolkin, R.D. Smolkin, E.R. Smolkin "Analysis of Magnetic Fields and Circuits in Separators With Plane-Parallel and Plane-Meridian Symmetry", IEEE Transactions On Magnetics, vol. 44, No. 8, August 2008, pp.1990-2001. 8. E. Matagne, G. Cividyan, V. Kluyskens "Exact Expression of Corner Reluctances in a Magnetic Circuit of Rectangular Section", Computer Field Models of Electromagnetic Devices, 2010, pp. 136-143. 9. Dolinskij Yu.M. K raschetu vtyazhnym 'elektromagnitov' / Yu.M. Dolinskij // Vestnik Har'kovskogo politehnicheskogo instituta. - 1968. - № 28 (76). - S. 56-62. 10. R.D. Smolkin, "Calculation of Magnetic Field Strength and Electromagnetic Ponderomotive Force of Separators", IEEE Transactions On Magnetics, vol. 38, No. 3, May 2002, pp.1528-1533. 11. Zagirnyak M.V. Raschet racional'nyh parametrov kruglyh pod'emykh 'elektromagnitov' / M.V. Zagirnyak, F.R. Habimana, Yu.A. Branspiz // Vestnik Vostochnoukrainskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Transport". - 1996. - S. 250-257. 12. Kartashyan V.O. Usovvershestvovannyj tesloampermetr A 4354/1 dlya issledovaniya postoyannym magnitnym polej / V.O. Kartashyan, A.P. Nesterenko, M.V. Zagirnyak// Pribyr i tekhnika eksperimenta. - 1975. - №1. - S. 239-240.

Поступила 24.10.2012

Шведчикова Ирина Алексеевна, д.т.н., доц.

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля кафедра "Приборы"

91034, Луганск, кв. Молодежный, 20а
тел. (0642) 417120, e-mail: ishved@i.ua

Shvedchikova I.A.

Calculation of a lifting electromagnet magnetic field via a conformal mapping method.

A conformal mapping method has been used to obtain a design formula for magnetic field strength in the operating area of a round lifting electromagnet. The expression introduced allows explicitly computing the field at any point of the initial area according to the coordinates of the point.

Key words – conformal mapping, magnetic field strength, design formula, lifting electromagnet.

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА С СОВРЕМЕННЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ И НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

Розглянуті п'ять систем електропостачання метрополітену, традиційна та системи електропостачання з активним випрямлячем і з накопичувачем енергії, виконана оцінка втрат енергії в схемах систем живлення метрополітену.

Рассмотрены пять систем электроснабжения метрополитена, традиционная и системы электроснабжения с активным выпрямителем и с накопителем энергии, выполнена оценка потерь энергии в схемах систем электроснабжения метрополитена.

ВВЕДЕНИЕ

Метрополитен (МП) обеспечивает значительную часть всех городских транспортных перевозок при высокой надежности движения [1]. В настоящие времена в метрополитенах Украины перевозка пассажиров обеспечивается, в основном, вагонами с коллекторными двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, питание которых осуществляется от контактной сети с номинальным напряжением 825 В. Контактная сеть питается от наземных или подземных тяговых подстанций (ТП), которые подключаются к сети 6(10) кВ через трехфазный понижающий трансформатор и диодный шестипульсный мостовой выпрямитель. Затраты электроэнергии на питание поездов в таких системах составляют до 80-95 % от общих затрат электроэнергии в МП и являются существенной составляющей себестоимости пассажирских перевозок (около 30 %) [1], [2]. Значительную часть затрат электроэнергии составляют потери на тяговых подстанциях, в контактной сети, тяговых электроприводах и их тормозных резисторах. Кроме того тяговые подстанции генерируют высшие гармоники тока в сеть 6(10) кВ, вызывая дополнительные потери энергии и искажения напряжения сети [3]. Вышеперечисленные факторы стимулируют поиск новых эффективных технических решений, которые позволяют существенно снизить потери энергии при эксплуатации метрополитенов.

В работе [4] рассмотрены характеристики традиционной тяговой подстанции и перспективных подстанций, в которых используется активный выпрями-

тель (АВ) или силовой активный фильтр (САФ). Использование активных выпрямителей открывает дополнительную возможность перехода от динамического к рекуперативному торможению в поездах с тяговыми электроприводами постоянного и переменного тока и полупроводниковыми преобразователями, при котором кинетическая энергия движущегося поезда частично возвращается в питающую сеть, что позволяет сократить потребление электроэнергии более чем в 2 раза. Дополнительное снижение потерь электроэнергии может быть достигнуто за счет использования накопителей энергии (НЭ), устанавливаемых на поезде или на тяговой подстанции.

В настоящей работе рассмотрены и сопоставлены по потерям энергии пять вариантов систем электроснабжения (СЭ) МП: традиционная, СЭ с АВ и рекуперацией энергии в сеть, СЭ с АВ и с стационарным или с бортовым НЭ, бесконтактная СЭ с бортовым НЭ. При определении относительных потерь энергии в качестве базисной величины была принята кинетическая энергия поезда МП.

ТРАДИЦИОННАЯ ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ

Традиционная ТП состоит из двух или более трехфазных трансформаторов, которые подключаются к шестипульсным мостовым диодным выпрямителям. В работе одновременно находятся два блока "трансформатор–выпрямитель". Для обеспечения надежности каждый участок контактной сети питается от двух параллельно включенных ТП. На рис. 1 представлена эквивалентная схема традиционной СЭ МП.

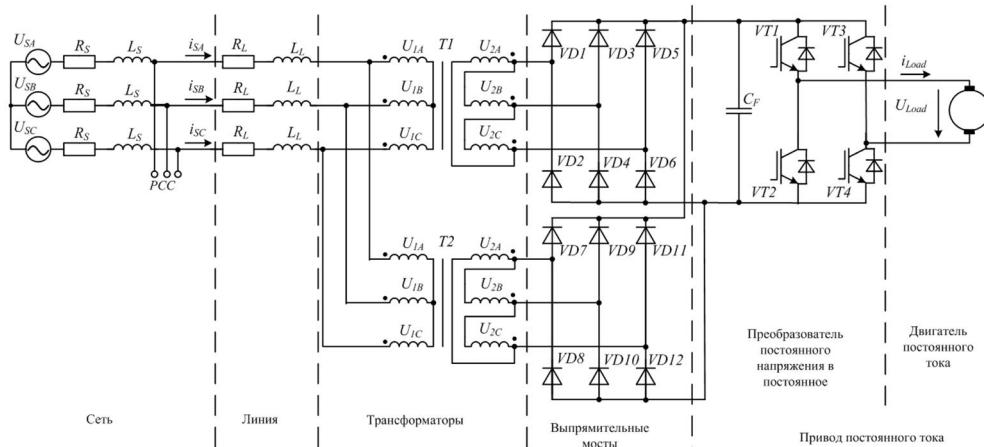


Рис. 1. Эквивалентная схема традиционной СЭ МП

© Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В., Холод О.И.

Сеть 6(10) kV представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений u_{SA} , u_{SB} , u_{SC} . Параметры сети учтены активным сопротивлением R_S и индуктивностью L_S . Параметры линии, которая соединяет тяговую подстанцию 6(10)/0,67 kV с подстанцией более высокого напряжения, учтены активным сопротивлением R_L и индуктивностью L_L . Сетевые обмотки трансформаторов T_1 , T_2 подключаются к сети 6 (10) kV, а вентильные – к шестипульсным мостовым диодным выпрямителям VD_1 – VD_6 (VD_7 – VD_{12}). Нагрузка представлена эквивалентным приводом постоянного тока, который состоит из преобразователя постоянного напряжения в постоянное (ППН) (VT_1 – VT_4) и двигателя постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением.

В современных приводах постоянного тока, которые применяются в МП, реализуется динамическое торможение, при котором кинетическая энергия движущегося поезда передается в тормозные резисторы и рассеивается в виде тепла. Время движения подвижного состава между двумя станциями в среднем составляет 180 s. При этом время разгона до номинальной скорости t_{ac} в среднем составляет 23,1 s, а время торможения t_{br} – 27,8 s. Время стоянки поезда на станции t_{st} – 30 s [1]. При условии, что после разгона поезд движется с номинальной скоростью на протяжении времени t_{mov} , равном 129,1 s, графики мощности, тока и напряжения нагрузки будут иметь вид, представленный на рис. 2. При традиционной СЭ МП график мощности сети, от формы которого зависит величина энергии потерь, показан на рис. 3.

При разгоне двигатели постоянного тока развивают номинальный момент на валу, мощность сети постепенно нарастает и в момент достижения поездом номинальной скорости становится равной номинальной мощности нагрузки плюс мощность потерь во всех элементах СЭ МП, $P_{S,nom}$. При движении поезда с постоянной скоростью, после разгона, двигатели постоянного тока развиваюют момент на валу равный статическому моменту, который, в качестве примера, принят равным 10 % от номинального момента, мощность сети соответственно становится равной 10 % от номинальной мощности нагрузки плюс потери во всех элементах СЭ МП, $0,1P_{S,nom}$.

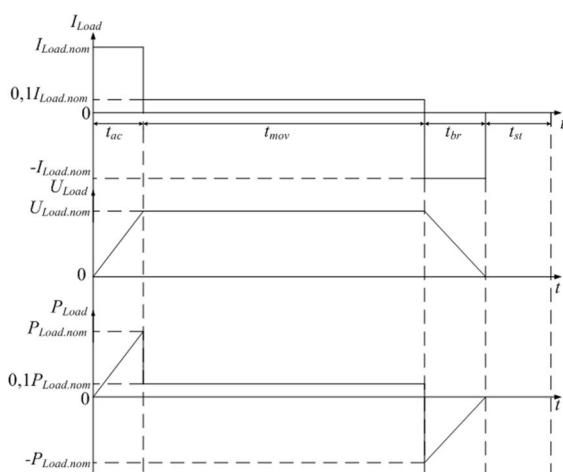


Рис. 2. Графики мощности, тока и напряжения нагрузки в интервале движения подвижного состава между станциями

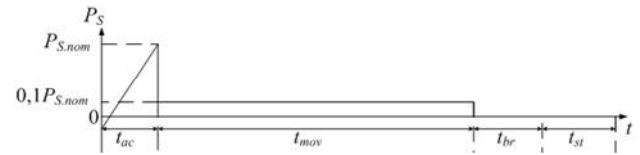


Рис. 3. График мощности сети в интервале движения подвижного состава между станциями

Величины потерь энергии в элементах СЭ МП, приведенные в табл. 1, рассчитаны с учетом выше приведенных условий. Статический момент может, например, составлять 20-30 % от номинального момента ДПТ поезда МП. В этом случае, мощность сети, при движении поезда с постоянной скоростью, будет соответственно равной $0,2P_{S,nom}$ или $0,3P_{S,nom}$, что приведет к увеличению потерь энергии в элементах СЭ МП в 1,3 – 1,8 раза от величин потерь энергии, приведенных в табл. 1.

На рис. 4 приведена MatLab-модель традиционной СЭ МП с эквивалентным приводом постоянного тока.

Модель состоит из тринадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 1, 3, 4 – 8, 10, 11;
- система управления – блок 9;
- датчики тока и напряжения – блок 2;
- многолучевые осциллографы – блоки 12, 13.

Назначение блоков силовой схемы: 1 – промышленная сеть; 3 – кабели, соединяющие тяговую подстанцию с подстанцией более высокого напряжения; 4, 5 – понижающие трансформаторы; 6, 7 – шестипульсные мостовые неуправляемые выпрямители; 8 – фильтрующий конденсатор на входе ППН; 10 – однофазный мостовой ППН; 11 – эквивалентный двигатель постоянного тока.

На рис. 5 представлены кривые токов и напряжений сети в установившемся режиме, тока и напряжения нагрузки в интервале движения поезда. Номинальная мощность нагрузки 2,64 MW.

Величины потерь энергии на участках СЭ и в подвижном составе МП, приведенные в табл. 1, представлены в процентах от максимальной кинетической энергии движущегося поезда:

$$E_{Loss*} = \frac{E_{Loss}}{E_k} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Кинетическая энергия поезда зависит от массы подвижного состава (примерно $225 \cdot 10^3$ kg) и номинальной скорости его движения (25 m/s)

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{225 \cdot 10^3 \cdot 25^2}{2} = 70,3 \text{ MJ}. \quad (2)$$

Кроме кинетической энергии движущийся поезд обладает энергией вращающихся масс и потенциальной энергией. Энергией вращающихся масс (колесных пар) можно пренебречь, так как она составляет около 0,2 % от кинетической энергии:

$$E_r = \frac{j\omega^2}{2} = \frac{mv^2}{8\pi^2} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 25^2}{8\pi^2} = 0,16 \text{ MJ}, \quad (3)$$

где j – момент инерции, ω – угловая скорость, m – масса колесных пар, v – линейная скорость движения поезда.

Таблица 1

Энергия потерь в СЭ МП в процентах от максимальной кинетической энергии поезда МП

Тип СЭ E_{Loss*} , %	Традиционная	СЭ с АВ и рекуперацией энергии в сеть	СЭ с АВ и стационарным НЭ	СЭ с АВ и бортовым НЭ	Бесконтактная СЭ с бортовым НЭ
Линия 6 kV	0,342	0,591	0,104	0,104	0,276
Трансформатор	0,484	0,551	0,097	0,097	0,152
Линия Тр. – Вып. и входные реакторы	0,078	1,269	0,223	0,223	0,197
Выпрямитель	0,113	1,084	0,554	0,554	0,528
Контактный рельс	1,498	3,61	3,61	0,584	0
ППН	1,318	1,318	1,318	1,318	1,318
ДПТ	3,746	3,746	3,746	3,746	3,746
НЭ	0	0	1,479	1,584	1,066
Тормозные резисторы	96,936	0	0	0	0
Всего	104,515	12,17	11,131	8,21	7,283

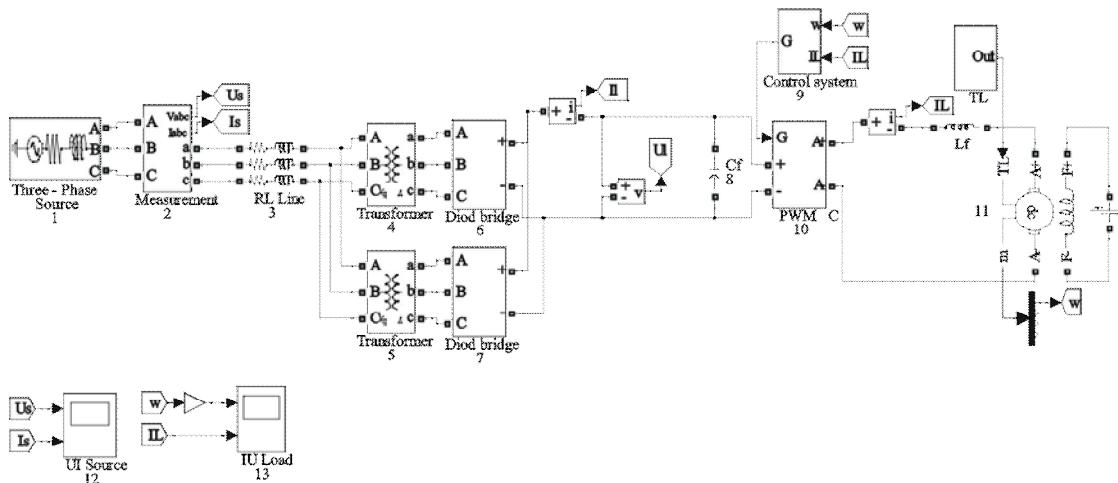


Рис. 4. MatLab-модель традиционной системы электроснабжения МП с приводом постоянного тока

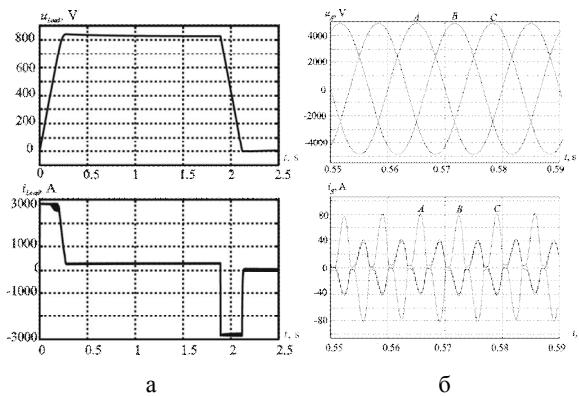


Рис. 5. Осциллографмы напряжения и тока сети и нагрузки

Потенциальная энергия поезда зависит от характера пути (спусков и подъемов), и может быть разной по величине, например, при подъеме или спуске на 30 м потенциальная энергия сопоставима с кинетической:

$$E_p = mgh = 225 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 30 = 66,2 \text{ MJ}, \quad (4)$$

где m – масса поезда, g – ускорение свободного падения, h – высота подъема.

В первом приближении при оценке потерь энергии был принят равномерный характер пути, также не учитывалось сопротивление воздуха в туннеле. Потери энергии на участке СЭ МП определялись из выражения:

$$E_{Loss} = RI^2 \Delta t, \quad (5)$$

где R – активное сопротивление в элементах СЭ МП (линия, обмотки трансформатора, полупроводниковые ключи выпрямителя, накопитель энергии, контактный рельс, полупроводниковые ключи ППН, двигатель постоянного тока, тормозные резисторы), I – действующее значение тока через элементы СЭ МП, Δt – интервал времени, в течение которого протекает ток I .

При расчетах учитывались графики мощности сети и нагрузки и, следовательно, графики тока сети и нагрузки. Для традиционной СЭ МП форма тока сети совпадает с формой графика мощности сети, представленного на рис. 3. Например, потери энергии в линии 6 kV при традиционной СЭ:

$$E_{Loss} = \frac{3}{\cos^2 \varphi} R_L I_S^2 \Delta t, \quad (6)$$

где $\cos \varphi$ – косинус угла сдвига сетевого тока относительно напряжения сети, I_S – действующее значение тока сети, R_L – активное сопротивление линии 6 kV.

$$R_L = \rho_{AL} \frac{l}{S}, \quad (7)$$

где ρ_{AL} – удельное сопротивление алюминия, l – длина линии, S – площадь поперечного сечения кабеля 6 kV.

С учетом графика мощности сети (рис. 3):

$$E_{Loss} = \frac{1}{\cos^2 \varphi_1} R_L I_{S1}^2 \Delta t_{ac} + \frac{3}{\cos^2 \varphi_2} R_L I_{S2}^2 \Delta t_{mov}, \quad (8)$$

$$E_{Loss} = \cos^{-2} 24^\circ \cdot 0,15 \cdot 225^2 \cdot 23 + \\ + 3 \cdot \cos^{-2} 8^\circ \cdot 0,15 \cdot 22,5^2 \cdot 129 = 332910 \text{ J},$$

$$E_{Loss*} = 0,47 \text{ %.}$$

Приведенные в табл. 1, результаты дают представление о величине потерь энергии в традиционной СЭ МП.

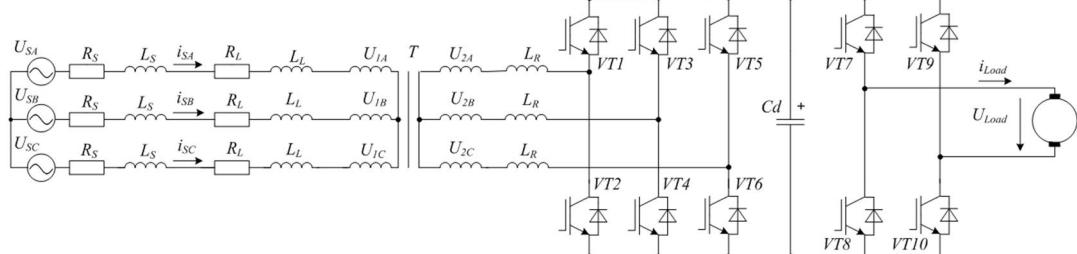


Рис. 6. СЭ МП с АВ и эквивалентным приводом постоянного тока

Сеть 6(10) kV представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений u_{SA} , u_{SB} , u_{SC} . Параметры сети учтены активным сопротивлением R_S и индуктивностью L_S . Параметры линии, которая соединяет тяговую подстанцию 6(10)/0,41 kV с подстанцией более высокого напряжения, учтены активным сопротивлением R_L и индуктивностью L_L . В отличие от традиционной СЭ, где напряжение на вентильных обмотках трансформаторов $T1$ ($T2$) составляет 0,67 kV, в СЭ с АВ необходимо обеспечить следующее соотношение между напряжением на конденсаторе C_d и максимальным линейным напряжением на входе АВ [5]:

$$U_C = (1,3 \dots 1,5) U_{max}. \quad (9)$$

Сетевая обмотка трансформатора T подключается к сети 6(10) kV, а вентильная через реакторы L_R к активному выпрямителю, выполненному на IGBT-транзисторах $VT1 - VT6$, с выходным конденсатором C_d . Нагрузка представлена эквивалентным приводом постоянного тока, который состоит из преобразователя постоянного напряжения в постоянное ($VT7 - VT10$) и двигателя постоянного тока.

Графики мощности, тока и напряжения нагрузки представлены на рис. 2, график мощности сети – на рис. 7.

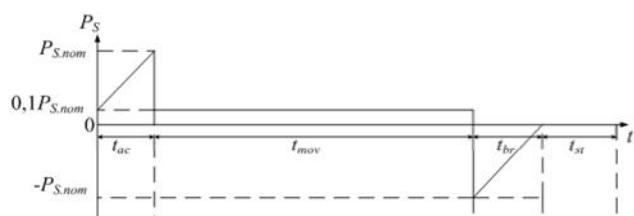


Рис. 7. График мощности сети в интервале движения подвижного состава между станциями

На рис. 8 приведена соответственно MatLab модель СЭ МП с АВ и приводом постоянного тока.

Модель состоит из четырнадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 1, 2, 4 – 6, 8, 9, 11, 12;

СЭ МП С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

И РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЬ

Применение АВ в СЭ МП обеспечивает улучшение электромагнитной совместимости СЭ с питающей сетью 6(10) kV [4], а также открывает дополнительную возможность перехода к рекуперативному торможению, при котором кинетическая энергия движущегося поезда возвращается в питающую сеть.

На рис. 6 представлена эквивалентная схема СЭ МП с АВ и приводом постоянного тока.

- система управления – блоки 7, 10;
- датчики тока и напряжения – блок 3;
- многолучевые осциллографы – блоки 13, 14.

Назначение блоков силовой схемы: 1 – промышленная сеть; 2 – активное сопротивление и индуктивность питающей сети; 4 – кабели, соединяющие тяговую подстанцию с подстанцией более высокого напряжения; 5 – понижающий трансформатор; 6 – входные реакторы АВ; 8 – АВ; 9 – выходной конденсатор АВ; 11 – однофазный мостовой ППН; 12 – эквивалентный двигатель постоянного тока.

В MatLab-модели (рис. 8) используется гистерезисная система управления. Переключение силовых ключей АВ происходит с изменяющейся частотой [5].

На рис. 9 представлены кривые токов и напряжений сети в установившемся режиме.

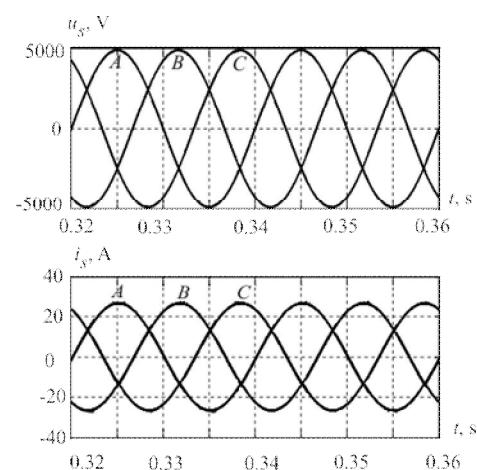


Рис. 9. Осциллограммы фазных токов и напряжений сети в установившемся режиме в СЭ с АВ

Кривые тока и напряжения нагрузки СЭ МП с АВ, аналогичные кривым тока и напряжения нагрузки традиционной СЭ МП, приведены на рис. 5.а. Номинальная мощность нагрузки 2,64 MW.

В табл. 1 приведены величины потерь энергии на участках СЭ МП с АВ и рекуперацией энергии в сеть.

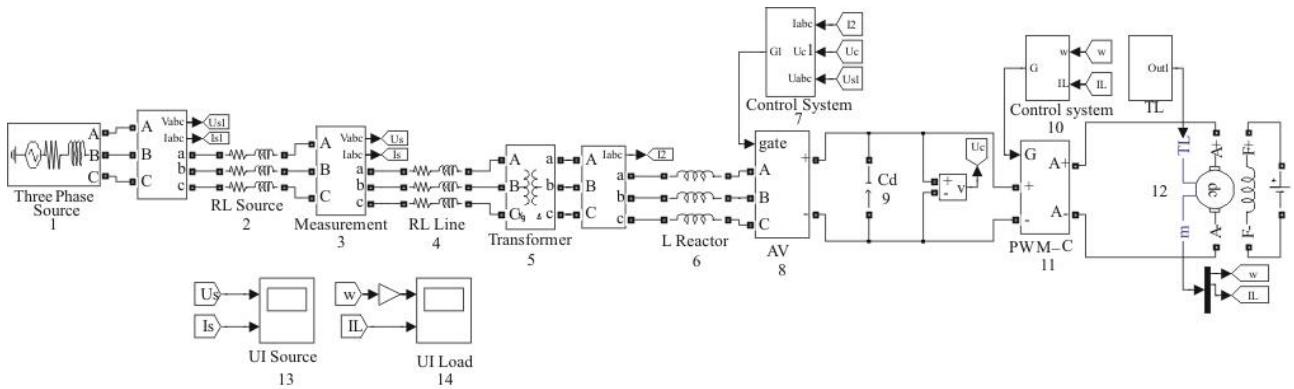


Рис. 8. MatLab-модель системы электроснабжения МП с АВ и приводом постоянного тока

При сравнении величин потерь энергии на отдельных элементах традиционной СЭ МП и СЭ с АВ, можно сделать вывод, что потери в элементах СЭ с АВ и рекуперацией энергии в сеть существенно увеличиваются по сравнению с потерями в традиционной СЭ, однако применение АВ обеспечивает электромагнитную совместимость СЭ МП с питающей сетью и передачу энергии, выделяемой при торможении поезда в сеть. За счет рекуперации энергии существенно снижается энергия, потребляемая из сети [6] и почти в четыре раза уменьшаются суммарные потери энергии.

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МП С АВ И СТАЦИОНАРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Недостатком СЭ с рекуперацией кинетической энергии в сеть является удвоение потерь в элементах схемы, вызванное передачей энергии через все элементы СЭ в обоих направлениях: от сети к нагрузке при разгоне и от нагрузки в сеть при торможении. Устранить этот недостаток возможно путем применения стационарного, устанавливаемого на тяговой подстанции, или бортового, устанавливаемого на подвижном составе, накопителя энергии.

С учетом величины накапливаемой энергии, величины тока заряда-разряда НЭ, и интервала времени, за который должен происходить цикл заряда-разряда, на сегодняшний день перспективным в роли НЭ для МП являются суперконденсаторы, например, выпускаемы фирмой Maxwell или фирмой Элтон [7-10].

Современные аккумуляторные батареи, выпускаемые ведущими фирмами, пока не могут быть использованы в качестве НЭ для СЭ МП, потому что, несмотря на высокие достижения в повышении их КПД, они характеризуются сравнительно малым числом допустимых циклов заряда-разряда [11, 12].

В роли стационарного НЭ может быть использован выходной конденсатор АВ. В этом случае на конденсаторный модуль будут накладываться ограничения, связанные со спецификой работы СЭ МП, АВ и ППН.

Энергия, накопленная в конденсаторном НЭ:

$$E_C = \frac{C_d U_C^2}{2}, \quad (10)$$

где C_d – емкость НЭ.

Учитывая ограничение, накладываемое на выходное напряжение АВ (9), необходимая емкость НЭ может быть определена из выражения:

$$C_d = \frac{E_k}{0,28U_{\max}^2}, \quad (11)$$

Максимальное линейное напряжение на входе АВ зависит от условия (9) и номинального напряжения нагрузки:

$$U_{\max} = \frac{U_{Load.nom}}{1,3}. \quad (12)$$

Силовая схема и MatLab-модель СЭ МП со стационарным накопителем энергии представлены на рис. 6 и рис. 8 соответственно. Отличие ее от СЭ МП с АВ и рекуперацией энергии в сеть заключается в алгоритме системы управления АВ и величине емкости выходного конденсаторного модуля АВ. MatLab-модель системы управления АВ для СЭ МП с стационарным НЭ представлена на рис. 10.

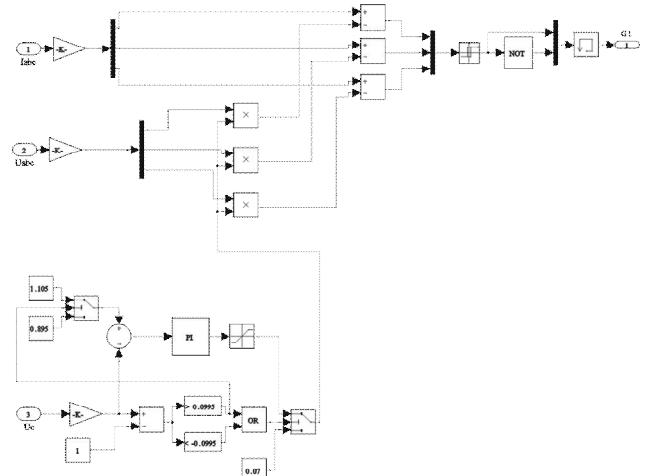


Рис. 10. Система управления АВ с выходным конденсатором НЭ

Система управления (СУ) АВ с выходным конденсаторным НЭ, выполненная на основе гистерезисного алгоритма работы, реализует следующие функции:

- формирование синусоидального сетевого тока в фазе с напряжением сети, при почти постоянной амплитуде сетевого тока в интервале движения поезда между станциями, ее величина зависит от величины потерь энергии в элементах СЭ МП, в том числе, в НЭ;

- поддержание постоянного напряжения на конденсаторном НЭ в пределах, которые ограничены условием стабильной работы АВ;

- обеспечение рекуперации энергии в сеть или потребления из сети дополнительной энергии в случае, когда напряжение на конденсаторном НЭ выходит за установленные пределы.

На рис. 11 приведены осциллографмы напряжения на конденсаторном НЭ, тока и напряжения нагрузки.

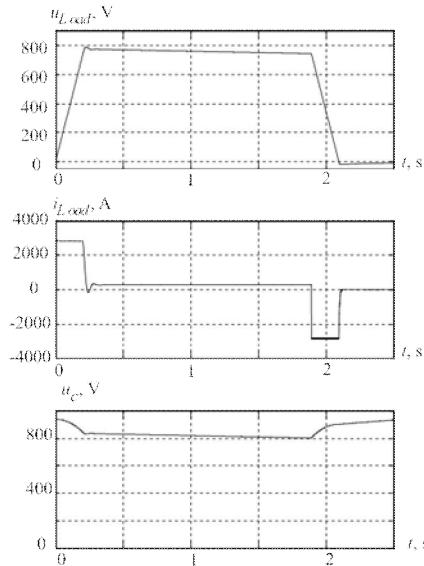


Рис. 11. Осциллографмы тока и напряжения нагрузки и напряжения НЭ

В табл. 1 приведены величины потерь энергии в элементах СЭ МП со стационарным НЭ. При сравнении величин потерь энергии в СЭ с стационарным НЭ и в традиционной СЭ или в СЭ с АВ и рекуперацией энергии в сеть можно сделать вывод – применение НЭ обеспечивает постоянство мощности сети, однодirectionalный поток энергии, от сети в нагрузку, и, как следствие, уменьшение потерь в элементах СЭ.

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МП С АВ И БОРТОВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Схема СЭ МП с бортовым НЭ представлена на рис. 12. Сеть 6(10) kV представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений u_{SA} , u_{SB} , u_{SC} . Параметры сети учтены активным сопротивлением R_S и индуктивностью L_S . Параметры линии, которая соединяет тяговую подстанцию 6(10)/0.41 kV с подстанцией более высокого напряжения, учтены активным сопротивлением R_L и индуктивностью L_L .

Сетевая обмотка трансформатора T подключается к сети 6(10) kV, а вентильная через реакторы L_R к активному выпрямителю, выполненному на IGBT-транзисторах $VT1 - VT6$, с выходным конденсатором C_d . Конденсаторный бортовой НЭ C_s подключается к

СЭ через широтно-импульсный преобразователь ($VT7 - VT8$, L_{Cs}).

Нагрузка представлена эквивалентным приводом постоянного тока, который состоит из преобразователя постоянного напряжения в постоянное ($VT9 - VT12$) и двигателя постоянного тока. Емкость НЭ определяется из условий, что напряжение на конденсаторном НЭ должно быть меньше напряжения на выходном конденсаторе АВ для нормальной работы ШИП, и изменение напряжение на НЭ ограничено пределами от максимального значения до половины от этого максимально напряжения, с учетом выражения для определения энергии, накопленной конденсатором (10):

$$C_s = \frac{8E_k}{3U_{cs}^2}, \quad U_{cs} < U_C \quad (13)$$

Кинетическая энергия E_k определяется по выражению (2), с учетом массы вагона поезда, равной $33 \cdot 10^3$ kg.

На рис. 13 приведена MatLab-модель СЭ МП с бортовым НЭ. Модель состоит из девятнадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 1, 2, 4 – 6, 8, 9, 11 – 13, 15, 16;
- система управления – блоки 7, 10, 14;
- датчики тока и напряжения – блок 3;
- многолучевые осциллографы – блоки 17 – 19.

Назначение блоков силовой схемы: 1 – промышленная сеть; 4 – кабели, соединяющие тяговую подстанцию с подстанцией более высокого напряжения; 5 – понижающий трансформатор; 6 – входные реакторы АВ; 8 – АВ; 9 – выходной конденсатор АВ; 11 – ШИП; 12 – выходной ректор ШИП; 13 – конденсаторный НЭ; 15 – однофазный мостовой ППН; 16 – эквивалентный двигатель постоянного тока.

MatLab-модель системы управления АВ для СЭ МП с бортовым НЭ представлена на рис. 14.

Система управления АВ выполнена на основе гистерезисного алгоритма, реализует следующие функции:

- формирование синусоидального сетевого тока в фазе с напряжением сети, при почти постоянной амплитуде сетевого тока в интервале движения поезда между станциями, ее величина зависит от величины потерь энергии в элементах СЭ МП, в том числе, в НЭ;
- поддержание постоянного напряжения на выходном конденсаторе;
- обеспечение рекуперации энергии в сеть или потребления из сети дополнительной энергии в случае, когда напряжение на конденсаторном НЭ выходит за установленные пределы.

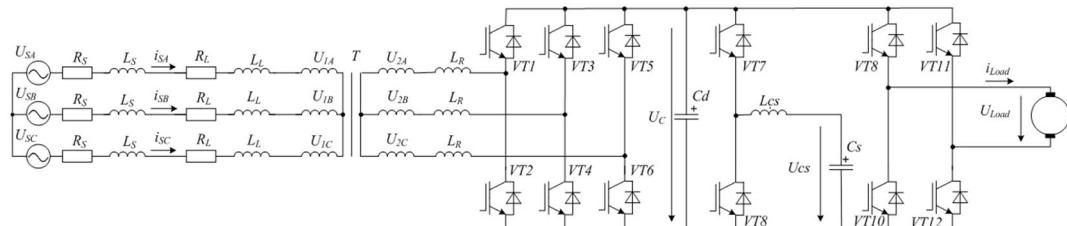


Рис. 12. Схема СЭ МП с бортовым НЭ

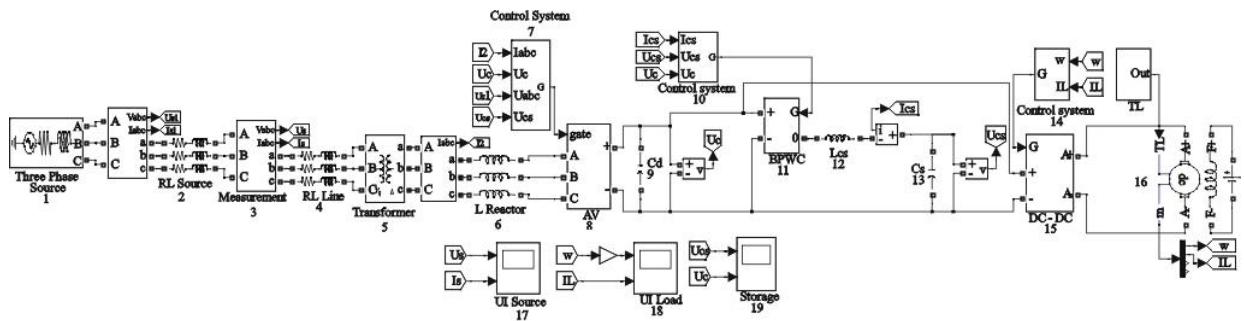


Рис. 13. MatLab-модель системы электроснабжения МП с бортовым НЭ

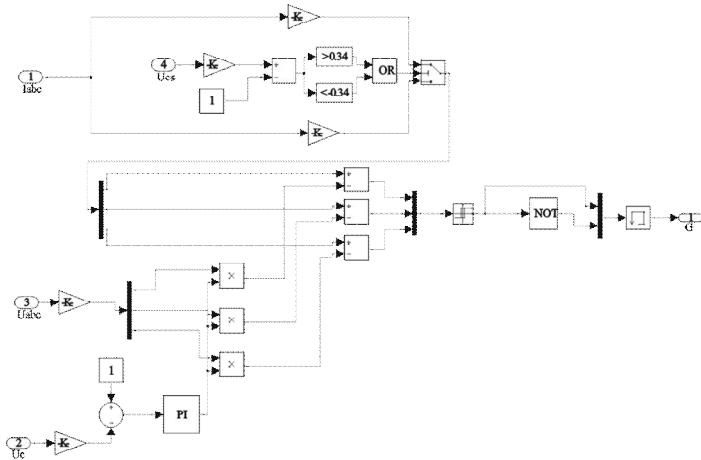


Рис. 14. Система управления АВ для СЭ МП с бортовым НЭ

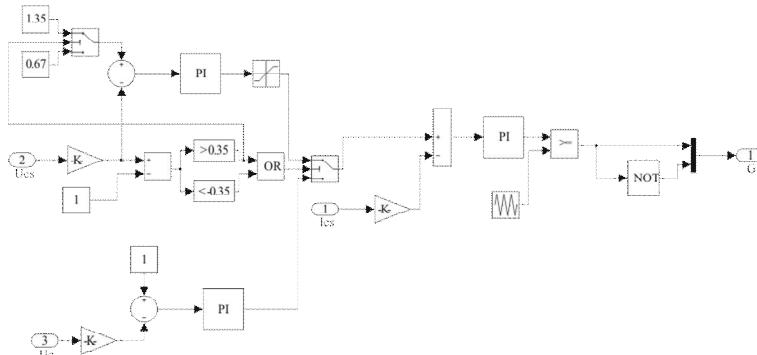


Рис. 15. Система управления ШИП с выходным конденсаторным НЭ

MatLab-модель системы управления ШИП с конденсаторным НЭ на выходе представлена на рис. 15.

Система управления ШИП с выходным конденсатором НЭ выполнена на основе алгоритма, которой реализует следующие функции:

- формирование тока конденсаторного НЭ в соответствии с током нагрузки;
- поддержание постоянного напряжения на конденсаторном НЭ в пределах, которые ограничены условием стабильной работы накопителя и ШИП.

На рис. 16 представлены кривые тока и напряжения нагрузки СЭ МП с бортовым накопителем энергии и кривая напряжения на НЭ. Номинальная мощность нагрузки 2,64 MW. В табл. 1 приведены величины потерь энергии на участках СЭ МП с бортовым НЭ. СЭ МП с бортовым НЭ в отличие от СЭ МП с стационарным НЭ позволяет уменьшить потери энергии в контактной сети.

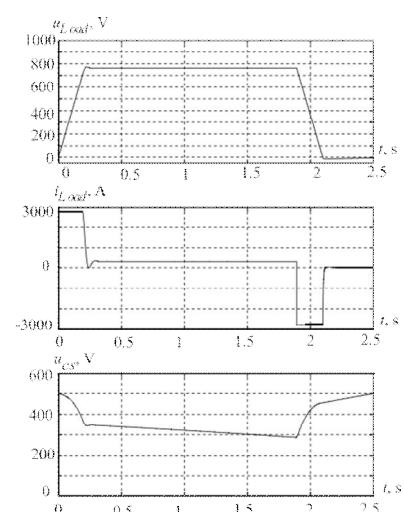


Рис. 16. Осциллографмы тока и напряжения нагрузки и напряжения НЭ

БЕСКОНТАКТНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МП С БОРТОВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

В работе [13] предложена бесконтактная СЭ МП с бортовым конденсаторным НЭ. При такой СЭ движение поезда между станциями осуществляется за счет энергии бортового конденсаторного НЭ, а во время стоянки на станции происходит подключение НЭ к сети и его дозаряд, необходимый для компенсации расхода энергии на преодоление сопротивления качения, сопротивления воздуха и на компенсацию потерь в элементах СЭ поезда. В случае избытка энергии при рекуперативном торможении, на подвижном составе предусматриваются тормозные резисторы. Схема бесконтактной СЭ МП с бортовым НЭ приведена на рис. 17.

На рис. 17 C_d – емкость конденсатора, подключаемого к шине постоянного напряжения. Конденсаторный бортовой НЭ C_s подключается к СЭ через ШИП ($VT_1 - VT_2, L_{cs}$). Нагрузка представлена эквивалентным приводом постоянного тока, который состоит из преобразователя постоянного напряжения в постоянное ($VT_3 - VT_6$) и двигателя постоянного тока.

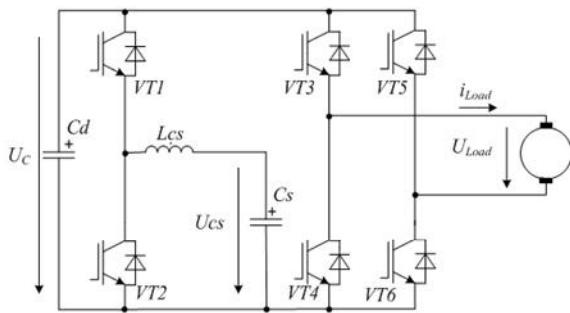


Рис. 17. Схема бесконтактной СЭ МП с бортовым НЭ

Необходимо также отметить, что график мощности сети будет иметь вид импульсов одинаковой длительности, равной времени стоянки поезда на станции (20-30 с) и различной амплитуды.

Емкость НЭ определяется условиями нормальной работы ШИП и конденсаторного НЭ из выражения (13).

На рис. 18 приведена MatLab-модель бесконтактной СЭ МП с бортовым НЭ.

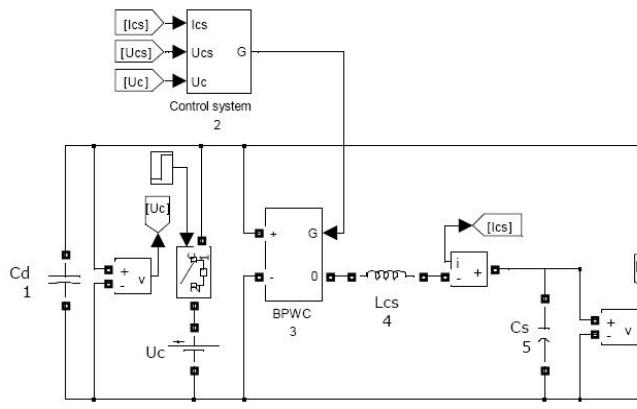


Рис. 18. MatLab-модель бесконтактной системы электроснабжения МП с бортовым НЭ

Модель состоит из девяти блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 1, 3 – 5, 7, 8;
- система управления – блоки 2, 6;
- датчики тока и напряжения;
- многолучевые осциллографы – блок 9.

Назначение блоков силовой схемы: 1 – конденсатор, подключающийся к шине постоянного напряжения; 3 – ШИП; 4 – выходной ректор ШИП; 5 – конденсаторный НЭ; 7 – однофазный мостовой ППН; 8 – эквивалентный двигатель постоянного тока.

MatLab-модель системы управления ШИП с конденсаторным НЭ на выходе в бесконтактной СЭ МП аналогична соответствующей MatLab-модели в СЭ МП с бортовым НЭ и выполняет такие же функции (рис. 15). В табл. 1 приведены величины потерь энергии на участках бесконтактной СЭ МП с бортовым НЭ.

В бесконтактной СЭ МП отсутствуют потери энергии в контактном рельсе, однако необходима большая установленная мощность СЭ, чем в СЭ с бортовым НЭ, так как дозаряд НЭ на станции происходит за интервал

времени в шесть раз меньший и примерно в четыре раза большим током, чем в СЭ МП с бортовым НЭ.

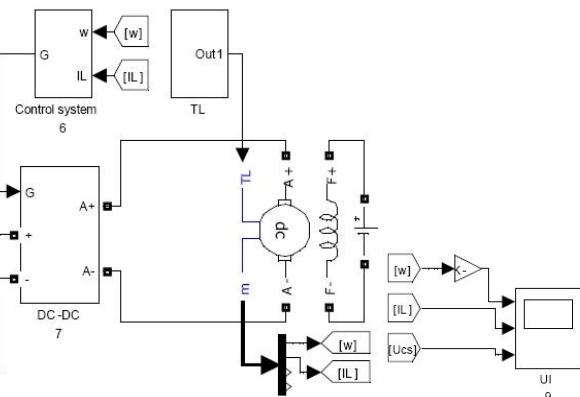
Приведенные в табл. 1, результаты дают представление об величине потерь энергии и эффекте применения рекуперативного торможения и НЭ в СЭ МП, рассматриваемых в данной работе. При разработке конкретной СЭ необходимы более точные расчеты с учетом всех составляющих потерь энергии и уточнением графика мощности.

ВЫВОДЫ

1. Переход от динамического или резистивного торможения к рекуперативному в поезде МП позволяет уменьшить в 2 и более раза энергию, потребляемую из сети на тягу поезда, и в четыре раза сократить потери энергии в элементах СЭ.

2. Применение стационарного или бортового НЭ позволяет обеспечить постоянство графика мощности сети и уменьшить потери энергии в элементах СЭ МП.

3. СЭ МП с бортовым НЭ обладает существенно меньшими потерями энергии в контактном проводе, чем СЭ с стационарным НЭ.



4. В бесконтактной СЭ МП отсутствуют потери энергии в контактном рельсе, однако увеличивается масса поезда и необходима большая установленная мощность СЭ, чем в СЭ с бортовым НЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.metro.kharkov.ua.
2. Хворост М.В. "Розвиток наукових основ систем електричної тяги метрополітенів" – автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.
3. Жемеров Г.Г., Ковал'чук О.І. Характеристики мощного шестипульсного мостового управляемого выпрямителя с емкостным фильтром // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №1. – С. 19-24.
4. Жемеров Г.Г., Холод О.І. Пути модернизации систем электроснабжения метрополитена // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – Част. 1. – 2012. – С. 27-35.
5. Жемеров Г.Г., Ковал'чук О.І. Автономный выпрямитель – источник напряжения с гистерезисной системой управления // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – Част. 2. – 2011. – С. 75-83.
6. М.П. Бычкова. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро // Электронный журнал "ЕНЕРГОСОВЕТ". – 2011. – № 3 (16).
7. Barrero, R.; Tackoen, X.; Van Mierlo, J. Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network // Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE.- P. 1-8.
8. Pavel, D.; Lubos, S. The energy storage system with supercapacitor for public transport // Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE.- P. 1826-1830.
9. <http://www.maxwell.com>.
10. <http://www.elton-cap.ru>.
11. Корев Д. Обзор аккумуляторных накопителей // Интеллектуальные сети России и Мира. Электронный ресурс www.smartgrid.su.
12. Vazquez, S.; Lukic, S.M.; Galvan, E.; Franquelo, L.G.; Carrasco, J.M. Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010. – Vol. 57. – No.12. – P. 3881-3895.
13. Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway. Allègre, A.-L.; Bouscayrol, A.; Delarue, P.; Barrade, P.; Chattot, E.; El-Fassi, S. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 57, Issue 12. – 2010, Page(s): 4001-4012.

Bibliography (transliterated): 1. www.metro.kharkov.ua. 2. Hvorost M.V. "Rozvitok naukovih osnov sistem elektrichnoї tyagi metropoliteniv" - avtoreferat disertaciї na zdobutya naukovogo stupenya doktora tehnichnih nauk. 3. Zhemerov G.G., Koval'chuk O.I.

Harakteristiki moschnogo shestipul'snogo mostovogo neupravlyayemogo vypryamitelya s emkostnym fil'trom // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2011. - №1. - S. 19-24. 4. Zhemerov G.G., Holod O.I. Puti modernizatsii sistem `elektrosnabzheniya metropolitenu // Tehnichna elektrodinamika. Temat. vip. "Silova elektronika ta energoefektivnist". - Chast. 1. - 2012. - S. 27-35. 5. Zhemerov G.G., Koval'chuk O.I. Avtonomnyj vypryamitel' - istochnik napryazheniya s gisterezisnoj sistemoj upravleniya // Tehnichna elektrodinamika: Tematichnyj vypusk "Silova elektronika ta energoeffektivnist". - Chast. 2. - 2011. - S. 75-83. 6. M.P. Bychkova. Sistema nakopitelej `elektro`energii dla povysheniya `energo`effektivnosti v metro // `Elektronnyj zhurnal "ENERGOSOVET". - 2011. - № 3 (16). 7. Barrero, R.; Tackoen, X.; Van Mierlo, J. Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network // Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE.- P. 1-8. 8. Pavel, D.; Lubos, S. The energy storage system with supercapacitor for public transport // Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE.- P. 1826-1830. 9. <http://www.maxwell.com>. 10. <http://www.elton-cap.ru>. 11. Korev D. Obzor akkumulyatornyh nakopitelej // Intellektual'nye seti Rossii i Mira. `Elektronnyj resurs www.smartgrid.su. 12. Vazquez, S.; Lukic, S.M.; Galvan, E.; Franquelo, L.G.; Carrasco, J.M. Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010. - Vol. 57. - No.12. - P. 3881-3895. 13. Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway. Allègre, A.-L.; Bouscayrol, A.; Delarue, P.; Barrade, P.; Chattot, E.; El-Fassi, S. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 57, Issue 12. - 2010, Page(s): 4001-4012.

Поступила 13.10.2012

Жемеров Георгий Георгиевич, д.т.н., проф.

Ильина Наталья Александровна, д.т.н., проф.

Холод Ольга Игоревна, аспирант

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника"

61002, г. Харьков, ул. Фрунзе 21

тел./факс: (057) 7076312

e-mail: zhemerov@gmail.com, Olha.kov@mail.ru

Тугай Дмитрий Васильевич, к.т.н., доц.

Харьковская национальная академия городского хозяйства

кафедра "Теоретическая и общая электротехника"

61002, Харьков, ул. Революции, 12

тел. (057) 7073111, e-mail: tugai_d@ukr.net

Zhemerov G.G., Ilyina N.A., Tugay D.V., Kholod O.I.
Subway power systems with modern semiconductor converters and energy storage devices.

Five subway power systems, a traditional power system and power systems with an active rectifier and an energy storage device, are considered. Estimation of energy loss in the analyzed subway power systems circuits is made.

Key words – active rectifier, subway power systems, efficiency, energy storage device, energy loss estimation.

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ИЗМЕРЕНИЕ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ. ЧАСТЬ 2. СХЕМЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Обговорюється можлива технологія вимірювань зовнішнього магнітного поля електроустаткування за схемами надпровідних точкових датчиків і контурних обмоток.

Обсуждаются возможная технология измерений внешнего магнитного поля электрооборудования по схемам сверхпроводящих точечных датчиков и контурных обмоток.

Прежде всего, рассмотрим вопрос о том, какая часть измеряемого магнитного потока проникает в сверхпроводящий сердечник элемента Мейснера, используемого в качестве точечных датчиков измерительной системы из четырех датчиков, рис. 1, если он выполнен из сверхпроводника второго рода.

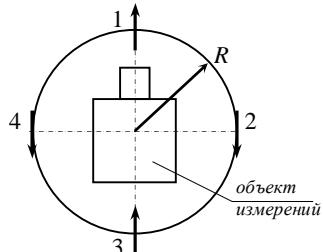


Рис. 1

Сверхпроводники второго рода имеют два критических поля H_{k1} и H_{k2} и в этом диапазоне сверхпроводник находится в "смешанном" состоянии, когда магнитное поле проникает в сверхпроводник отдельными квантами потока $\Phi_0=2,07 \cdot 10^{-7}$ Гс·см² = $2,07 \cdot 10^{-15}$ Вб [1]. Поскольку с увеличением глубины проникновения поля (например при $T \rightarrow T_c$) величина H_{k2} растет, а H_{k1} уменьшается [2], то вполне вероятно, что измеряемое внешнее магнитное поле электрооборудования окажется в диапазоне $H_{k1} \leq H \leq H_{k2}$. Автор вихревой решетки проникающих в сверхпроводник второго рода квантов Φ_0 Абрикосов А.А. в работе [2] приводит размеры таких вихрей: находящаяся в нормальном состоянии "сердцевина" размером ε (длина когерентности или размер куперовской пары) с магнитным потоком Φ_0 и внешняя область размером λ (глубина проникновения) со сверхпроводящим током вихря. При увеличении магнитного поля плотность вихрей возрастает, а расстояние между ними сокращается и при величине поля H_{k2} вихри соприкасаются своими нормальными сердцевинами и происходит фазовый переход второго рода – сверхпроводник переходит в нормальное состояние [1]. Период квадратной вихревой решетки ℓ_0 можно определить из формулы $B\ell_0^2 = \Phi_0(H\ell_0^2 = \Phi_0)$ [2]. Если измеряемое поле находится в пределах $(0,1 \div 1) \text{ Э}$, то $\ell_0 = (1,44 \cdot 10^{-3} \div 4,55 \cdot 10^{-4})$ см. Определим какой процент измеряемого магнитного потока в элементе Мейснера составит поле вихревой решетки при магнитном поле $H=1\text{Э}=10^3/4\pi$ А/м. Например прямоугольный сердечник размером сечения $a \times b = (2 \times 2)$ см² будет содержать $n=m^2$ вихрей с потоком Φ_0 , где $m=a/\ell_0=b/\ell_0=2/10^{-4} \cdot 4,55 = 0,44 \cdot 10^4$. Тогда суммарный магнитный поток в вихре будет равен $\Phi_0 \cdot n = 2,07 \cdot 10^{-15} \cdot 0,44^2 \cdot 10^8 = 0,4 \cdot 10^{-7}$ Вб, а весь измеряемый магнитный поток $\Phi = \mu_0 \cdot H \cdot a \cdot b = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^3/4\pi \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0,4 \cdot 10^{-7}$ Вб. Таким образом, в смешанном

состоянии через сверхпроводник второго рода проходит весь измеряемый поток (в виде n вихрей, несущих квант магнитного потока Φ_0 каждый). Из этого обстоятельства следует, что использование сверхпроводников второго рода в качестве сердечника элементов Мейснера в измерительной системе четырех точечных датчиков целесообразно в том случае, когда измеряемое поле меньше первого критического поля материала сверхпроводника H_{k1} (а значит реализуется эффект Мейснера при уменьшении температуры до $T < T_c$ – выталкивание магнитного поля из тела сердечника).

Более предпочтительными являются контурные измерительные системы, которые исключают из измерений три следующие за диполем пространственные гармоники [3], что позволяет приблизить ИС к объекту и тем самым улучшить соотношение сигнал-помеха.

На рис. 2 представлены две кольцевые обмотки, которые при включении на диполь ($n = 1$) и соотношении размеров $\ell = r$, исключают из измеряемого поля три, следующих за диполем мультипола (квадруполь $n = 2$, октуполь $n = 3$ и $n = 4$). Создаваемый охватываемым такой ИС объектом магнитный поток может быть измерен при переводе колец в нормальное состояние в собранном виде или по отдельности. В зависимости от формы и габаритов измеряемого объекта наряду с кольцевыми контурными ИС могут использоваться седлообразные или квадратные ИС [3].

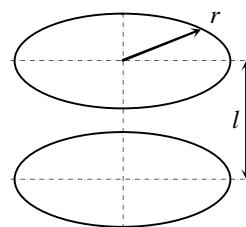


Рис. 2

1. Возможная технология измерений

1.1. Измерения поля остаточной и индуцированной намагниченности

а) Измерение с помощью помехозащищенной системы четырех точечных датчиков Мейснера (рис. 1), которая позволяет исключить из измерений поле Земли и промышленных помех. Стрелками на рисунке обозначено направление магнитной оси датчиков. После установки технического объекта в центре измерительной системы перевести датчики в режим сверхпроводимости (магнитное поле выталкивается из датчиков) и одновременно измерить ЭДС. Затем перевести датчики в нормальное состояние (магнитный поток проходит через датчики) и измерить ЭДС.

© Боев В.М.

Затем повернуть объект на 180° и повторить измерения. Сумма показаний при двух положениях объекта (различие 180°) дает индуцированную намагниченность, разность – остаточную. Следует отдельно определить индуцированную и остаточную намагниченности при переходе датчиков из нормального состояния в сверхпроводящее и отдельно при обратном переходе, затем взять полусумму. Вышеописанная схема измерений может составить конкуренцию измерениям остаточных и индуцированных полей магнитометром с четырьмя датчиками.

Примечания. Основными препятствиями к реализации вышеописанной измерительной системы будут:

1. Необходимости выполнения многовитковых обмоток для датчиков.

2. Возможная неодновременность сверхпроводящего перехода в различных датчиках системы.

Оба фактора могут существенно повлиять на погрешность измерений. Однако, во втором случае возможны измерения для каждого из датчиков в отдельности с последующим расчетом в соответствии со схемой соединения датчиков.

б) Измерение с помощью двух включенных на диполь (размещенных для измерения диполя) контурных сверхпроводящих колец (используется эффект Оннеса). Расстояние между кольцами равно радиусу колец.

Перевести кольца в сверхпроводящее состояние и удалить измеряемый объект. Измерить захваченный кольцами магнитный поток (например, измерив ток в кольцах). Переводом колец из сверхпроводящего состояния в нормальное, также можно измерить захваченный поток каждого из колец (ЭДС от исчезающего потока). Результаты измерений для каждого из колец складываются, т.к. включение – на диполь. Затем установить измеряемый объект в противоположном направлении (с поворотом на 180° относительно предыдущего положения) и повторить измерения. Сумма данных измерений прямого и обратного положения дает удвоенное значение индуцированного поля объекта. Поле земли (и постоянные во времени помехи) не наводит ЭДС, так как остается сцепленным с кольцами и после перевода их в нормальное состояние. Разность данных измерений прямого и обратного положения даст удвоенное значение поля остаточного намагничивания.

Примечание. При этом следует иметь в виду, что магнитный поток, захваченный кольцами, может измеряться отдельно в каждом кольце, в том числе, перенесенном в другое место (захваченный поток сохраняется). При условии точного измерения потоков колец, точность измерений в целом будет высокой.

1.2. Измерение внешнего магнитного поля электрооборудования от постоянных токов.

а) Измерение с помощью помехозащитной системы четырех датчиков Мейснера.

Включить измеряемое оборудование, установленное в центре измерительной системы, перевести датчики в сверхпроводящее состояние и измерить возникающую при этом ЭДС. Затем перевести датчики в нормальное состояние и измерить ЭДС. Результат определяется как полусумма значений поля, вычисленных по ЭДС входления датчиков в сверхпроводящее состояние и выхода из него.

б) Измерение с помощью двух сверхпроводящих контурных колец (размещенных в соответствии с раз-

мерами измерительных контурных обмоток предназначенных для измерения дипольных магнитных моментов). После установки измеряемого электрооборудования в центре системы двух контурных колец установить требуемый режим работы электрооборудования. Затем перевести контурные кольца в сверхпроводящее состояние и выключить электрооборудование. Измерить захваченный каждым из колец магнитный поток (например, измерив величину сверхпроводящего тока или путем перевода колец в нормальное состояние и измерения ЭДС от исчезающего магнитного потока). Результаты измерений по каждому из колец складываются (измеряется дипольное поле). При этом магнитное поле Земли, поле остаточной и индукционной намагниченности и поле постоянных во времени промышленных помех не входят в измеряемый захваченный поток, т.к. все время остаются сцепленными с кольцами.

Примечание. В случае использования для определения потока закона Фарадея, предварительно должна быть исследована взаимосвязь ЭДС (несинусоидального, апериодического характера) с захваченным магнитным потоком (при переводе колец в нормальное состояние). Если захваченный поток измерить точно, то и точность измерений в целом будет высокой.

Таким образом, основным преимуществом сверхпроводящих измерительных систем является возможность исключения из измерений поля промышленных помех и магнитного поля Земли, что может существенно повысить точность измерений. К недостаткам следует отнести общезвестные неудобства, связанные с низкотемпературными установками (даже если они работают при температуре жидкого азота 77°K).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. – М.: Наука, 1982. – 240 с.
2. Абрикосов А.А. Сверхпроводники второго рода и вихревая решетка. – УФН. – 2004. – № 11. – С. 1234-1239.
3. Боев В.М. Экспериментальное определение распределения полей рассеяния электрооборудования в окружающем пространстве. – ИВУЗ, Энергетика. – 1981. – № 6. – С. 32-37.

Bibliography (transliterated): 1. Shmidt V.V. Vvedenie v fiziku sverhprovodnikov. - M.: Nauka, 1982. - 240 s. 2. Abrikosov A.A. Sverhprovodniki vtorogo roda i vihrevaya reshetka. - UFN. - 2004. - № 11. - S. 1234-1239. 3. Boev V.M. Eksperimental'noe opredelenie raspredeleniya polej rasseyaniya elektrooborudovaniya v okruzhayuschem prostranstve. - IVUZ, 'Energetika. - 1981. - № 6. - S. 32-37.

Поступила 29.05.2012

Боев Вячеслав Михайлович, д.т.н., проф.

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

Кафедра "Теоретические основы электротехники"

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

тел/факс (057) 7076961

Boev V.M.

Superconductivity and measurement of external magnetic fields of electrical equipment. Part 2. Circuits and measuring technology.

A feasible measuring technology for external magnetic field of electrical equipment with application of circuits of superconducting point sensors and loop windings is discussed.

Key words – magnetic field, superconductivity, measuring technology.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВНОГО ИНДУКТОРА ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

У статті проведена порівняльна оцінка параметрів двошарового індуктора, що складається з зовнішнього тонкого провідного шару і масивної підкладки, з параметрами суцільного індуктора.

В статье проведена сравнительная оценка параметров двухслойного индуктора, состоящего из внешнего тонкого проводящего слоя и массивной подложки, с параметрами сплошного индуктора.

При магнитно-импульсной обработке материалов одним из важнейших параметров является электрическая проводимость индуктора. В то же время силы, действующие на деформируемую заготовку согласно третьему закону Ньютона, действуют и на индуктор. Кроме того, процессы, магнитно-импульсной обработки материала кратковременны и протекают при явно выраженным поверхностном эффекте. Следовательно, материал индуктора должен быть хорошим проводником, а сам индуктор – массивным и прочным. Наиболее подходящим материалом для индуктора является медь, которая обладая малым значением удельного электрического сопротивления, является достаточно прочным материалом. Тем не менее, использование медного индуктора нерационально, так как за счет поверхностного эффекта его эффективное сечение будет на порядок меньше фактического сечения.

Цель данной статьи заключается в сравнительной оценке параметров составного индуктора (состоящего из внешнего тонкого проводящего слоя и массивной подложки) с параметрами сплошного индуктора. Вид расчетной модели в цилиндрической системе координат и граничные условия для деформируемой заготовки показаны на рис.1.

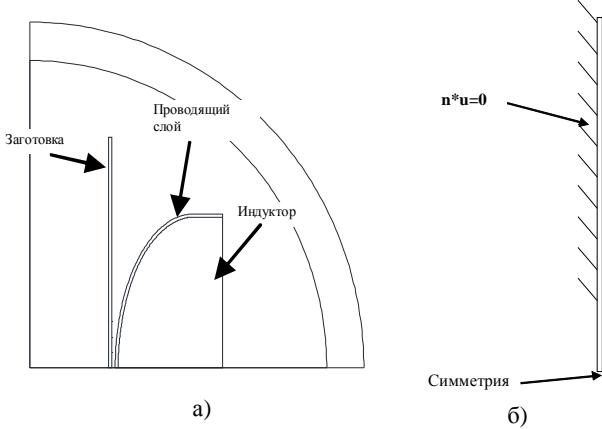


Рис. 1. Расчетная модель, где а) расчетная модель в цилиндрической системе координат;

б) граничные условия для деформируемой заготовки

Допущения, принятые для расчетной модели: напряжение разрядного конденсатора приложено к сечению индуктора;

не учитывается сопротивление токоподводящих проводов и переходное контактное сопротивление;

при деформации заготовки не учитывались пластические деформации;

не учитывались потери энергии, и связанные с ними дополнительные деформации заготовки.

Такие допущения не оказывают влияние на сравниваемые характеристики. Форма индуктора принималась такой же как и в работе [1].

Расчетные уравнения с учетом возможного изменения объема деформируемой заготовки для каждой из под областей определяются уравнениями [2-4]:

$$\sigma_k \cdot \frac{dA_k}{dt} + \text{rot} \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \text{rot} \times A_k) = (\sigma_k \cdot \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot r}) \cdot e_\phi, \\ (\lambda + G) \cdot \nabla \cdot \text{div}(u) + G \cdot \nabla^2 u - \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + f = 0$$

где σ – проводимость; A – векторный магнитный потенциал; μ – магнитная проницаемость; U – напряжение приложенное к индуктору; r – радиальная координата; e_ϕ – орт; u – вектор перемещений; ρ – плотность; f – вектор объемных сил.

В (1) записана полная производная, так как движение заготовки оказывает влияние на распределение поля.

Система (1) записана в общем виде, но для каждой из областей уравнение будет соответствовать физическим параметрам области и должна быть дополнена граничными условиями симметричности, а также условиями внешней границы, имитирующей бесконечное пространство. Начальные условия нулевые.

Напряжение, приложенное к индуктору, определяется напряжением на ёмкости:

$$U = U_0 - \frac{1}{C} \cdot \int_t i \cdot dt,$$

где U_0 – начальное напряжение на конденсаторе; C – ёмкость; i – ток индуктора.

Силы Лоренца в (1) определялись по формуле:

$$f = j \times B,$$

где f – сила на единицу объема; j , B – плотность тока и магнитная индукция в деформируемой заготовке.

Суммарная сила Лоренца определялась по формуле:

$$F_L = \iint_S \{j \times B\} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot dz.$$

Рассматривались два варианта индуктора: 1) сплошной медный; 2) составной – медь и немагнитная сталь.

Расчеты проводились для следующих параметров.

Геометрия заготовки и индуктора:

- заготовка – алюминиевый цилиндр с толщиной стенки 2 мм;

- индуктор – материал медь в случае сплошного индуктора;

- для составного индуктора – толщина слоя равна 2,0 мм, материал медь;
- материал подложки – немагнитная сталь с проводимостью $4.032 \cdot 10^6$ [S/m].

Параметры разрядного контура:

- вид разряда – апериодический;
- начальное напряжение на конденсаторе – 400 В;
- емкость 10000 мкФ.

Результаты расчетов показывают, что при используемых материалах и принятых параметрах разрядного контура значения электромагнитных сил, действующих на заготовку одинаковы (рис. 2) и не отличаются ни по величине, ни по форме.

На рис. 3 приведены значения токов для сплошного и составного индукторов.

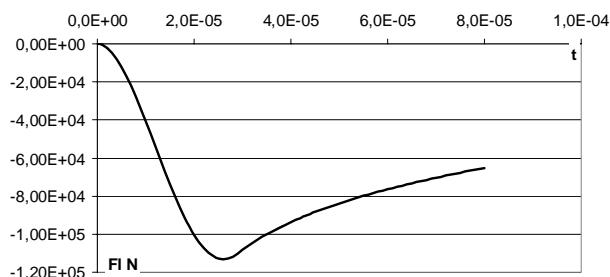
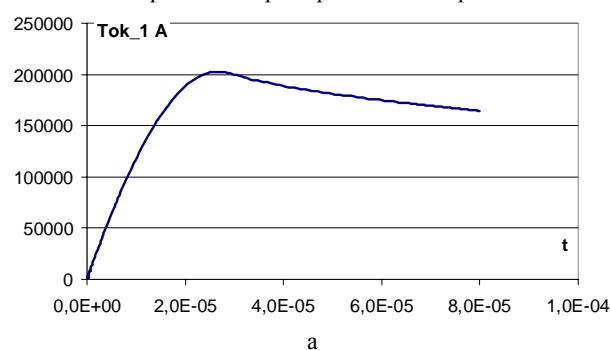
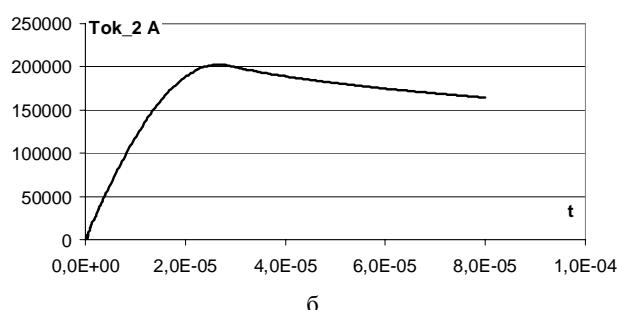


Рис. 2 Значения электромагнитных сил для первого и второго расчетного вариантов



а



б

Рис. 3 Значения суммарных токов индуктора:
а) сплошной; б) составной

Как следует из рис. 3, значения токов в индукторах практически идентичны, что и определяет идентичность электромагнитных сил. Т.е. силы, действующие на заготовку в случае сплошного медного индуктора и индуктора, у которого медный слой имеет толщину 2,0 мм, одинаковы. Это подтверждает положение о том, что в индукторе имеет место явно выраженный поверхностный эффект и основная часть сечения индуктора не оказывает влияние на происходящие процессы.

На рис. 4 показана картина магнитного поля.

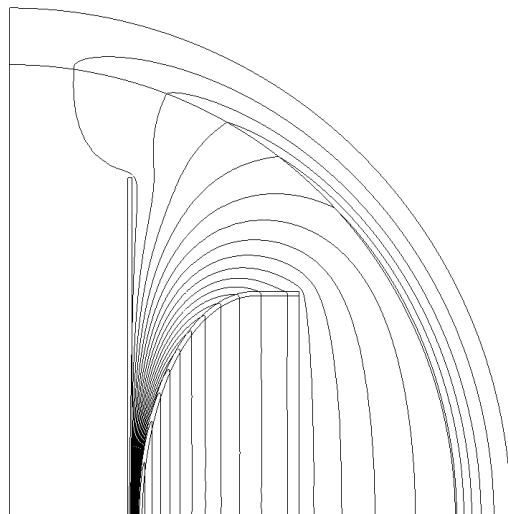


Рис. 4 Картина поля (момент $t = 3 \cdot 10^{-5}$ с)

На рис. 5 показаны значения токов в составном индукторе.

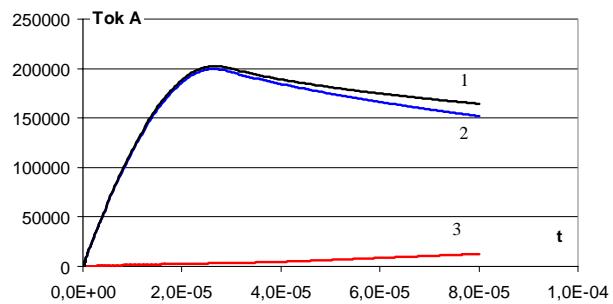


Рис. 5 Значения тока составного индуктора:
1 – ток индуктора; 2 – ток проводящего слоя; 3 – ток подложки

Как следует из рис. 5 ток проводящего слоя много больше тока подложки и именно он определяет силовое воздействие поля на заготовку.

На рис. 6 показано значение максимальной деформации и напряжения в материале, которые так же идентичны.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что за счет поверхностного эффекта в создании электромагнитной силы принимает участие тонкий поверхностный слой материала индуктора, в котором сосредоточено практически все значение тока, как показывают расчеты 92%.

Следовательно, в качестве подложки может быть использован практически любой, даже непроводящий материал.

На рис. 7 приведено распределение плотности тока по толщине слоя в момент $t = 3 \cdot 10^{-5}$ с (максимальное значение электромагнитной силы Лоренца).

В заключении необходимо отметить, что тепловая удельная мощность, выделяемая в поверхностном слое индуктора и заготовке достаточно велики. На рис. 8 показаны значения удельной мощности в среднем сечении системы, однако, за счет кратковременности процесса температура деформируемой заготовки и индуктора увеличивается незначительно.

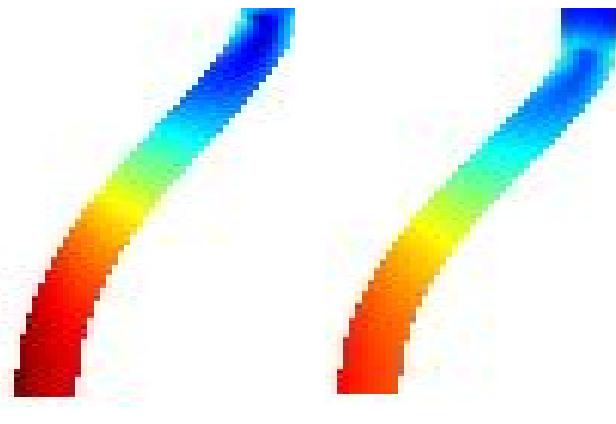


Рис. 6 Деформация и распределение напряжений по Мизесу в материале заготовки: а) сплошной индуктор; б) составной

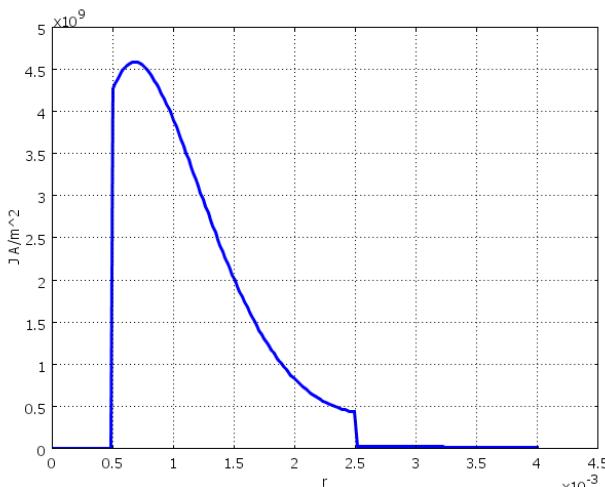


Рис. 7 Распределение плотности тока по толщине проводящего слоя в среднем сечении индуктора

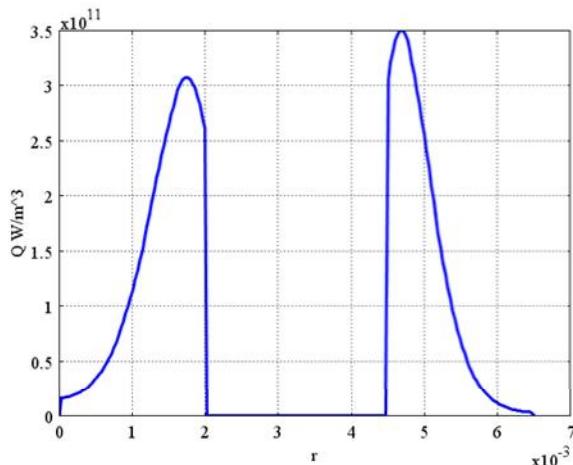


Рис.8 – Значение удельной тепловой мощности, выделяемой в заготовке и индукторе в момент максимума тока

Рассчитанное значение магнитной индукции в пространстве между деталью и индуктором в плоскости $z=0$ показано на рис. 9.

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

– ток, протекающий по тонкому внешнему проводящему слою составляет величину порядка 92% от общего тока системы;

– деформация заготовки практически одинакова в случае целого и составного индуктора;

– тепловая мощность, выделяемая в заготовке достаточно велика, но ее влияние на деформацию заготовки можно не учитывать за счет кратковременности процесса.

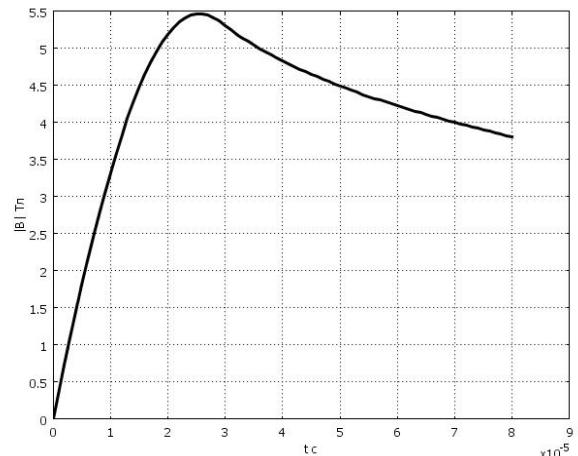


Рис.9 Значения магнитной индукции в системе

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Байдя Е.И. Динамика деформации объекта при магнитно-импульсной обработке материала // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 6. – С. 56-59.
- Рамо С., Уиннери Д. Поля и волны в современной радиотехнике. – М. – Л-д.:ОГИЗ. Главная редакция технико-теоретической литературы, 1948. – 631 с.
- Френкель Я.И. Курс теоретической механики. – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с.
- Тимошенко С.П., Гудъер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. / Под редакцией Шапиро Г.С. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bajda E.I. Dinamika deformacij ob'ekta pri magnitno-impul'snoj obrabotke materiala // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2010. - № 6. - S. 56-59. 2. Ramo S., Uinneri D. Polya i volny v sovremennoj radiotekhnike. - M. - L-d.:OGIZ. Glavnaya redakciya tehniko-teoreticheskoy literatury, 1948. - 631 s. 3. Frenkel' Ya.I. Kurs teoretycheskoj mehaniki. - Leningrad: Tipografiya "Krasnyj pechatnik", 1939. - 386 s. 4. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti: Per. s angl. / Pod redakcijei Shapiro G.S. - M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. - 560 s.

Поступила 06.11.2012

Байдя Евгений Иванович, к.т.н., доц.

Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электрические аппараты"
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21
тел. (057) 7076976, e-mail: baida_kpi@mail.ru

Bayda E.I.

Comparative analysis of parameters of a composite coil for magnetic pulse material working.

The article presents evaluation of parameters of a two-layer coil consisting of a thin outer layer and a conductive solid substrate as compared with parameters of a solid inductor.

Key words – magnetic pulse metal working, inductor, electromagnetic processes, comparative evaluation.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОСТИ, СОЗДАВАЕМОГО МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ С КОНУСНОЙ ВЫЕМКОЙ

У роботі розглянуто електричний вибух у рідині, між електродами з конусним виколобком стосовно до задачі створення кавітаційної порожнини з фокусуванням ударних хвиль. Досліджена швидкість спрямованого руху кавітаційної порожнини, одержані криві зміни прозорості рідини на довжині хвилі 650 нм, встановлений вплив зниженого тиску на акустичні сигнали при фокусуванні ударних хвиль.

В работе рассмотрен электрический разряд в жидкости между электродами с конусной выемкой применительно к задаче создания кавитационной полости с фокусировкой ударных волн. Исследована скорость направленного движения кавитационной полости, кривые изменения прозрачности жидкости на длине волны 650 нм, влияние пониженного давления на акустические сигналы при фокусировке ударных волн.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из востребованных научно-промышленных направлений является различного рода воздействие на тела с целью изменения их свойств с помощью электрогидравлических эффектов. Данные эффекты используются для разрушения, деформирования и диспергирования твердых тел, эмульгирования жидкостей, очистки различного рода поверхностей. Импульсное воздействие обеспечивается ударами при расширении и захлопывании кавитационных полостей и микропотоком вблизи образующихся пузырьков в процессе развития электрического разряда в жидкости. Другие воздействия связаны с процессом ионизации, происходящем в процессе развития электрического разряда в жидкости.

Электрогидравлический разряд исследован в ряде работ [1-4]. В отличие от известных работ, в данной работе рассматривается электрогидравлический разряд между электродами с конусной выемкой, при котором обеспечивается создание и перемещение кавитационной полости в заданном направлении. При этом, ударные волны, образующиеся в результате быстрого роста давления, возникающего в плотной плазме в процессе развития разрядного канала, и последующих пульсаций кавитационной полости, отражаются от поверхности электрода, имеющего конусную выемку, и фокусируются в заданном направлении. Полагается, что полученные рассматриваемым способом кавитационные полости могут быть применены для более энергоэффективного импульсного воздействия на тела, находящиеся в жидкостях.

Целью данной работы является экспериментальное исследование электрического разряда в жидкости, создаваемого между электродами с конусной выемкой.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты проводились на установке, принципиальная электрическая схема которой представлена на рис. 1.

Установка работает следующим образом. От высоковольтного трансформатора TV типа УРС-70 через выпрямитель VD и зарядное сопротивление R заряжалась конденсаторная батарея С. Напряжение заряда конденсатора измерялось с помощью киловольтметра

PV. После достижения требуемого напряжения запускался управляемый разрядник F, что приводило к подаче напряжения на электроды 1 и 3, расположенные в электрогидравлическом реакторе ЭГР. Форма электродов изменялась в процессе исследований. Замыкание разрядного промежутка осуществлялось двумя способами: искровым пробоем и взрывающейся проволочкой 2. Измерение разрядного тока осуществлялось с помощью пояса Роговского (ПР), подключенного к электронному осциллографу.

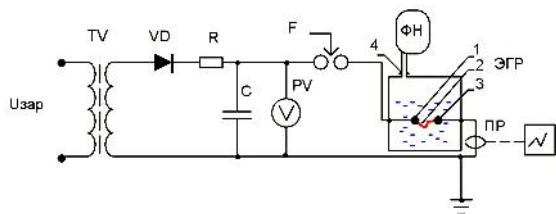


Рис. 1. Принципиальная схема установки "ГИДРА"

Вакуумная откачка, как известно [1, 8], продлевает время жизни кавитационной полости, и применялась в данной работе для более качественного исследования процессов. Поэтому, ЭГР подключался к форвакуумному насосу ФН через вентиль 4. Вакуумирование также стимулирует появления кавитационных пузырьков, на которых рассеивается свет от когерентного источника. Качественная картина воздействия вакуумной откачки представлена на рис. 2. В данной работе вакуумирование осуществлялось до давления 6,6-20 кПа.

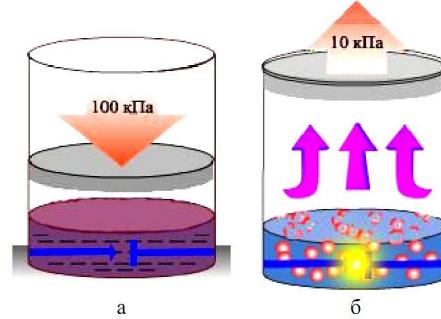


Рис. 2. Жидкость при атмосферных условиях (а), жидкость в условиях пониженного давления после электроразряда (б)

Изменение прозрачности жидкости (воды) осуществлялось с помощью лазера с длиной волны излучения $\lambda = 650$ нм, соответствующей характерному размеру пузырьков в воде при данном давлении, и регистрирующего фотодиода типа ФД 24К работающего в диапазоне 300-1100 нм (рис. 3).

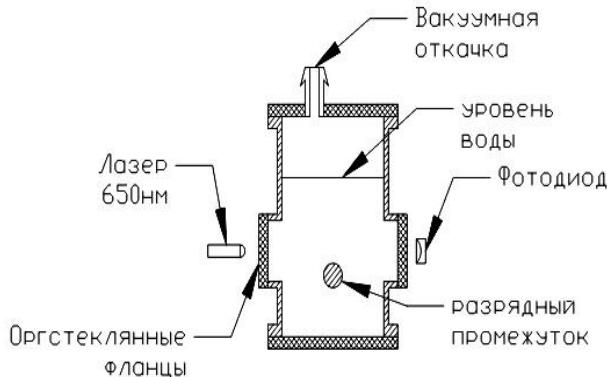


Рис. 3. Расположение системы оптической диагностики в электрогидравлическом реакторе

Прозрачность измерялась в относительных единицах от 0 до 1, где калибровочным сигналом "1" служила прозрачность ЭГР без жидкости. После заполнения ЭГР водой прозрачность уменьшалась до $\varemathbb{e} \approx 0,9$ (рис. 4,а). После возникновения электрического разряда в жидкости наблюдалось изменение прозрачности во времени (рис. 4,б). Используя данные измерения, оценивалось время жизни кавитационной полости и газовых пузырьков. По интенсивности сигнала, на фотодиоде, зависящей от образования газовых пузырьков, оценивалась эффективность разряда. Следует отметить, что ранее была установлена линейная зависимость уровня прозрачности жидкости от энергии, вложенной в разряд [8].

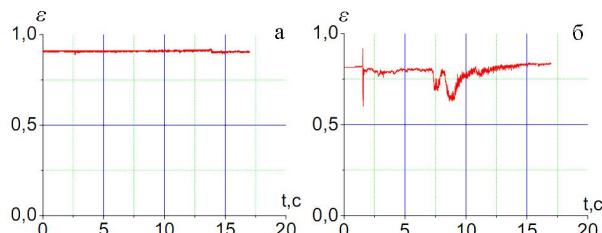


Рис. 4. Результаты измерения прозрачности при атмосферном давлении без разряда (а) и с разрядом при давлении 20 кПА (б)

Измерение акустических сигналов, возникающих при разряде в жидкости, осуществлялось с помощью пьезокерамического датчика, соединенного с ЭГР. Датчик крепился на корпусе камеры ЭГР снаружи. Чувствительный элемент датчика соединялся с удлиняющим диэлектрическим стержнем длиной 150 мм, а другой конец стержня вводился в реактор. Целью измерений была оценка влияния давления в ЭГР на интенсивность сигнала, регистрируемого датчиком. Получено, что в условиях понижения давления в ЭГР увеличивается амплитуда и длительность сигналов (рис. 5,а-б).

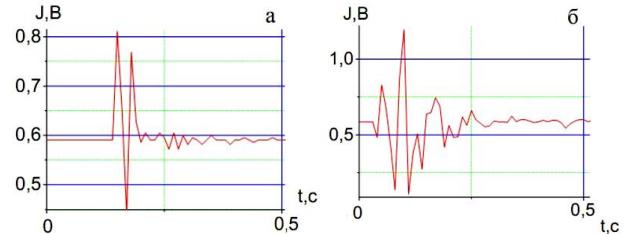


Рис. 5. Сигналы, регистрируемые на пьезокерамическом датчике, в случае разряда в жидкости при 100 кПа (а) и при 20 кПа (б)

Так, в случае разряда в жидкости при 100 кПа (рис. 5,а) длительность акустического сигнала составляет $\tau \sim 100\text{-}200$ мс, амплитуда сигнала $J_{max} = 0,35$ В, количество колебаний составило $n = 2\text{-}3$ колебания. В случае разряда в жидкости при 20 кПа (рис. 5,б) имеем $\tau \sim 300$ мс, $J_{max} = 1,25$ В, $n = 4\text{-}7$. Таким образом, акустика в условиях вакуумной откачки ведет себя иначе, чем при атмосферном давлении. Увеличение интенсивности сигналов, регистрируемых датчиком давления, показывает возрастание амплитуды ударно-акустических волн давления в случае уменьшения давления в реакторе, что, по нашему мнению, может положительным образом сказаться на процессе выведения газов из жидкостей.

Сравнение характера развития кавитационной полости осуществлялось при двух типах разрядов: искровой разряд и разряд через взрывающиеся проволочки. В качестве взрывающейся проволочки применялся медный проводник диаметром $d = 0,1$ мм и длиной $l = 150$ мм. Проволочка устанавливалась между электродами в виде полупетли (рис. 6).

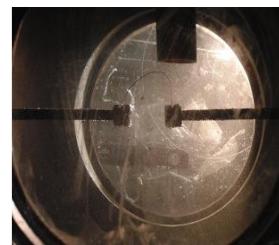


Рис. 6. Вид взрывающейся проволочки, установленной в ЭГР

Для придания требуемого направления движения кавитационной полости использовалась электродная система с конусной выемкой в катоде (рис. 7). Электроды изготавливались из нержавеющей стали, угол раствора конуса составил 20° , межэлектродный промежуток равнялся 3-5 мм (рис. 7,а).

Данная система электродов с конусной выемкой образует рефлектор. Принцип действия данного рефлектора представлен на рис. 8. Рефлектор фокусирует образующиеся в результате электрогидравлического разряда волны давления, действие которых в свою очередь в дальнейшем реализуется через пульсирующую кавитационную полость. Стрелками указаны направления движения ударных волн, приводящих к направленному движению кавитационной полости. Таким образом, предлагаемая система электродов выполняет роль своеобразной гидропушки, осуществляющей фокусировку ударных волн.

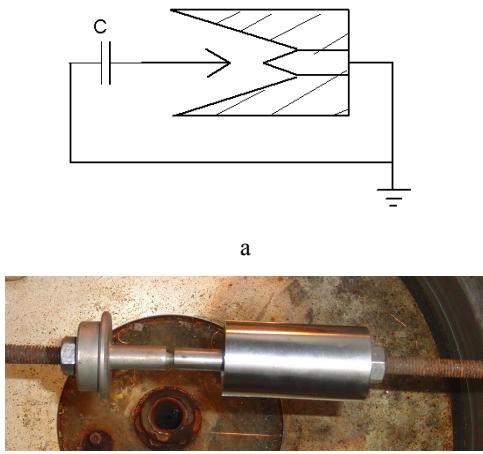


Рис. 7. Схема (а) и общий вид (б) системы электродов с конусной выемкой

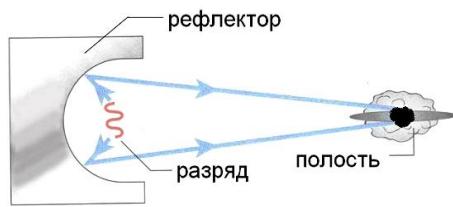


Рис. 8. Схема работы рефлектора

Проведено сравнение кривых разрядных токов, возникающих в случаях искрового разряда и разряда через взрывающиеся проволочки (рис. 9).

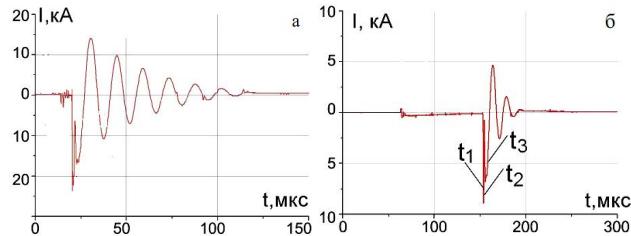


Рис. 9. Осциллограммы тока в случаях искрового разряда в воде (а) и разряда через взрывающиеся проволочки в воде (б)

Как видно (рис. 9, а), амплитуда тока, регистрируемого при искровом пробое воды с предлагаемой системой электродов при концентрации солей 3 г/л, составляет $I_{\max} = 22$ кА, а для взрывающейся проволоки (рис. 9, б) имеем $I_{\max} = 8$ кА. Наличие выброса тока в начальный момент времени при искровом пробое может быть связано с током смещения, так как в начальный момент времени искровой канал имеет достаточно высокое сопротивление, а межэлектродная система при этом имеет некую емкость.

Изменение концентрации солей в воде в большую сторону искусственным способом считалась не целесообразной, поскольку установлено, что увеличение последней приводит к уменьшению амплитуды излучаемой ударно-акустической волны [2].

Последовательность событий при электрическом разряде через взрывающиеся проволочки в жидкости следующая. Конденсатор разряжается на межэлектродный промежуток (МЭП) в цепи с паразитной ин-

дуктивностью L , время задержки между пробоем разрядника и моментом появления тока на МЭП определяется длиной высоковольтного кабеля и сопротивлением среды в межэлектродном промежутке. При протекании тока МЭП нагревается, и ток растет t_1 . Проволока плавится, а жидкость начинает кипеть с образованием пара. Затем проволока нагревается в жидком состоянии, и когда ее сопротивление начинает возрастать, проволока теряет металлическую проводимость. Сопротивление проволоки становится на несколько порядков выше, и ток в цепи обрывается момент времени t_2 . Это и есть пробой МЭП, и электрический взрыв проволоки, и разлет продуктов взрыва в окружающую среду. Затем начинается дуговой разряд через продукты взрыва, момент времени $t > t_3$.

Проведено скоростное фотографирование развития кавитационной полости. Съемка осуществлялась цифровой фотокамерой Casio Exilim EX-FH100 Black, расположившейся напротив области разряда снаружи камеры. Съемка велась через оргстеклянный фланец. Скорость съемки в режиме видео составляла 420 кадр/с.

На рис. 10 показана покадровая съемка электро-гидравлического разряда в жидкости при атмосферных условиях и искровом разряде между электродами с конусной выемкой.

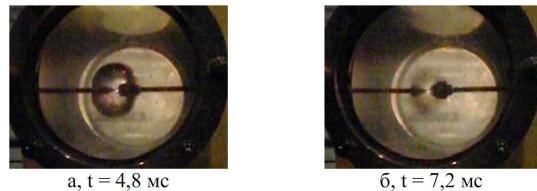


Рис. 10. Покадровая съемка искрового разряда в воде при атмосферных условиях

Как видно, в данном случае кавитационная полость (КП), формируется и достигает своего максимума за время 4,8 мс. Диаметр КП в момент наибольшего расширения $d \sim 40$ мм. После чего полость, сжимаясь, начинает рассасываться, и не совершает пульсаций. Полное время жизни составляет до 10 мс. После исчезновения КП не выявлено образования газовых кавитационных пузырьков.

Применение пониженного давления над поверхностью жидкости вносит существенные дополнения в рассматриваемые процессы (рис. 11). На рис. 11, а изображен момент после межэлектродного пробоя, характеризующийся выходом из электрода с конусной выемкой продуктов разряда, имеющих большую температуру, приводящих к нагреву близлежащих слоев жидкости ее испарению, с образованием кавитационной полости. Видно, что рефлектор задает полости направленное движение. Расстояние, на которое перемещается полость, составляет 75-80 мм.

КП сжимается до размеров меньших или соизмеримых с диаметром рефлектора 10-20 мм. Форма полости близка к сферической. Для данной системы можно говорить о скорости распространения КП, которая составляет 0,9 м/с. Траектория ее перемещения зарегистрирована на скоростной фотосъемке. Время жизни полости и образовавшихся пузырьков кавитации составляет $\sim 8,5$ с.

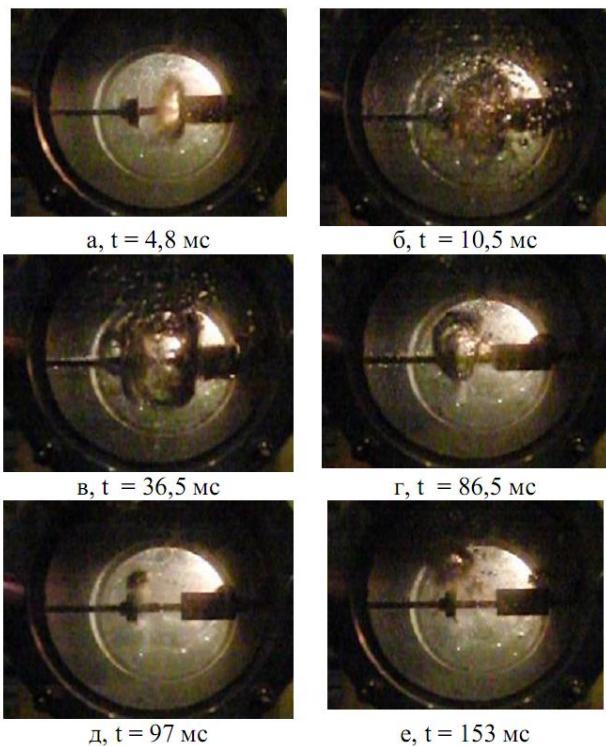


Рис. 11. Покадровая съемка разряда с катодом с конусной выемкой при пониженном давлении 20 кПа в жидкости

Для сравнения, проведено скоростное фотографирование электрогидравлического разряда в жидкости при разряде через взрывающиеся проволочки (рис. 12). Получено, что в начальный момент среда не возмущена в ней нет движения примесей, и не наблюдаются газовые пузыри. На кадре (а) показан момент пробоя МЭП, характеризующийся образованием плазменной парогазовой области. Известно [1], что данная область состоит из продуктов электролиза, таких как (H_2 , O_2 , H^+ , O^- , OH^-), в сочетании с продуктами эрозии материала электродов, ионов, электронов и капельной фазой). Диаметр видимой на данном кадре парогазовой оболочки составляет около 40 мм.. Согласно [1] она характеризуется температурой $\sim 4 \cdot 10^4$ °С и больше, давлениями $1 - 10^3$ МПа. На кадре (б) показан момент одного из этапов формирования кавитационной полости содержащей продукты разряда имеющих большую температуру и расширяющихся под воздействием возникших ударных волн высокого давления и образовавшиеся вокруг нее пузырьками кавитации.

Кадры (б, в) – рост кавитационной полости, диаметр КП в момент наибольшего расширения $d \sim 120$ мм. Затем давление внутри КП падает и когда гидростатическое давление снаружи превышает внутреннее, полость начинает сжиматься, кадры (г). Граница кавитационной полости останавливается в своем движении, и полость сжимается, энергия сжатой жидкости постепенно переходит на передний фронт обратной волны, т. е. на границу полости. Это обстоятельство является причиной того, что почти вся энергия разряда, отошедшая к полости (т.е энергия запаздывающего потока), в течение каждого цикла возникновения и захлопывания полости практически не покидает сравнительно небольшой объем жидкости

вблизи зоны разряда. В начальный момент захлопывания полости в окружающей ее жидкости возникает все время расширяющаяся сферическая граница раздела движений жидкости, еще продолжающей двигаться от полости, и жидкости, уже начавшей двигаться к захлопывающейся полости.

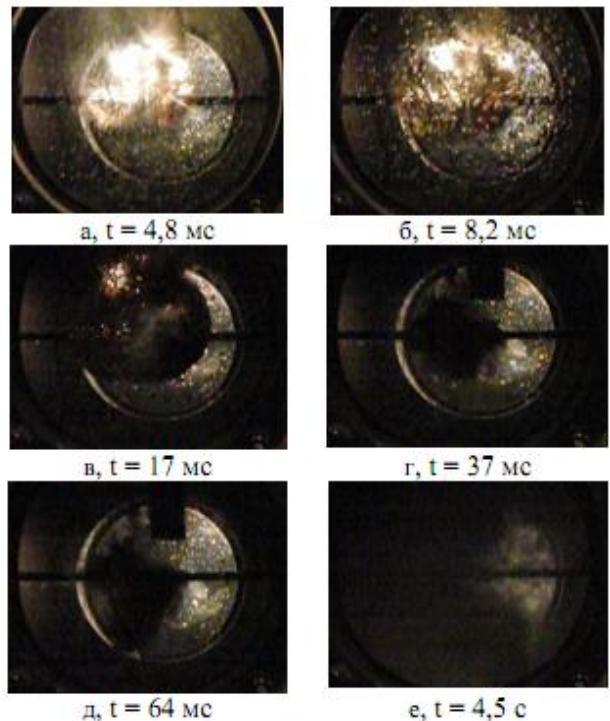


Рис. 12. Покадровая съемка взрыва медной проволочки при давлении 20 кПа в жидкости

Здесь образуется кавитирующее кольцо – сотни тысяч пузырьков обычных кавитаций, располагающихся тороидом, лежащим в плоскости, перпендикулярной к линии разряда по ее середине. По мере расширения верхней границы этой области и по мере удаления ее от полости, разрывающие жидкость усилия постепенно ослабевают и наконец, исчезают, что и определяет верхнюю границу существования кавитирующего кольца. Внутренняя (нижняя) граница кольца определяется диаметром той начальной области, где, прежде всего, проявились разрывающие жидкость усилия, однако эта нижняя граница выражена менее резко.

Кавитирующее кольцо играет очень большую роль в процессе захлопывания кавитационной полости. Отдельные пузырьки кольца, находящиеся вблизи полости, под влиянием растягивающих усилий расширяются быстрее других, и сжимающаяся полость при этом как бы растягивает их, в силу чего ее в общем правильная сферическая поверхность несколько искажается "д". В результате при захлопывании полости могут возникать местные скачки давления, во много раз превышающие те давления, при которых полость возникла. Свойства кавитационной полости, образующейся при различных параметрах разряда, могут существенно различаться. Так, например, при работе на малых емкостях (жестких режимах) полость почти лишена продуктов газо- и парообразования и потому заметной плавучестью не обла-

дает. Только при работе на больших емкостях (мягких режимах) значительное количество образующихся при этом газов и паров может придать полости некоторую плавучесть. Кроме того, из-за различия в плотности верхних и нижних слоев жидкости, в зоне разряда при образовании полости верхние слои над разрядом, сжимаясь в одинаковой степени с нижними, тем не менее, перемещаются от линии разряда значительно дальше нижних, в связи, с чем полость в верхней своей части искажается, становится несимметричной, и при захлопывании испытывает со стороны результирующих сил значительное итоговое усилие, направленное сверху вниз (см. кадр "г"). Таким образом, полость при работе на жестких режимах будет тонуть, совершая при этом одну (реже две) пульсации. При работе на мягких режимах при небольших энергиях импульса полость также будет тонуть, но уже после нескольких пульсаций. В нашем случае число пульсаций во время экспериментов 2-3. Затем наступает стадия роста и всплытия кавитационных пузырьков, зародившихся во время предыдущих стадий процесса, кадр "е".

Можно сказать, что ЭГ разряд в жидкости характеризуется наличием нескольких пульсаций кавитационной полости, каждая из которых обладает значительными давлениями. Период пульсаций, т.е фаза расширения и схлопывания составляет 27 мс. Расширение ~ 13 мс, сжатие ~ 14 мс. Эти времена сопоставимы с длительностями пульсаций 1, 2 отмеченными на рис. 5,б. Вторая пульсация приблизительно равна первой, фаза расширения ~ 12,2 мс. Длительность существования кавитационных пузырьков составляет ~ 12 с.

Для определения влияния способа укладки проволоки, были рассмотрены варианты, когда проволока уложена с выгибанием к верху и к низу.

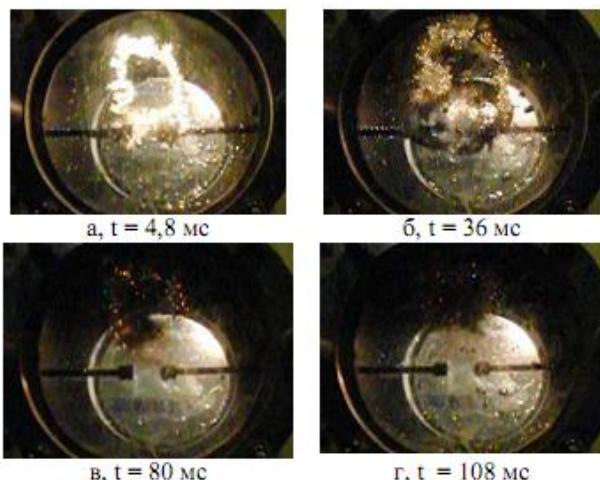


Рис. 13. Покадровая съемка разряда с укладкой проволочки кверху при пониженном давлении 20 кПа в жидкости

Видно, что данный способ расположения проволоки приводит к образованию КП неидеально круглой формы. Было установлено также, что способ расположения проволоки не влияет на направление распространения КП, во всех случаях она всплывает вверх, без продвижения вглубь жидкости. Время жизни полости и образовавшихся пузырьков кавитации составляет ~ 510 мс.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В представленных табл. 1, 2 рассмотрены характеристики, по которым производилось сравнение разрядов: τ_p – время разгона полости, τ_c – время схлопывания полости, $\tau_{ж}$ – время жизни полости, d – минимальный диаметр КП, N – количество пульсаций. Рассматриваемые системы инициации: 1 – дпроволочка расположена вдоль оси электродов, 2 – проволочка в верхней полуплоскости от оси электродов, 3 – система с катодом с конусной выемкой.

Таблица 1

С.И.	$\tau_p, \text{мс}$	$\tau_c, \text{мс}$	$\tau_{ж}, \text{мс}$	$V_p, \text{м/с}$	$V_c, \text{м/с}$	$V_h, \text{м/с}$
1	20	19	506	6,24	2,5	-
2	32	48	152	3,8	1,5	-
3	26	57	150	4,3	0,6	0,9

Таблица 2

С.И.	$d_{\max}, \text{КП, мм}$	$d_{\min}, \text{КП, мм}$	K_1	K_2	N
1	128	80	1,6	2,5	12
2	120	50	2,4	2,5	3
3	113	15	7,5	7	3

Для анализа введены коэффициенты характеризующие степень деформации КП и скорость изменения ее размеров. Коэффициент пространственной трансформации, K_1 , определяемый как отношение максимального диаметра КП, к минимальному:

$$K_1 = \frac{d_{\max}}{d_{\min}}. \quad (1)$$

K_2 – коэффициент скоростной трансформации, который определяется отношением скорости разгона к скорости схлопывания:

$$K_2 = \frac{V_p}{V_c}, \quad (2)$$

Из полученных данных видно, что в первом случае $\tau_p \sim \tau_c$, что может быть причиной столь долгого существования КП.

Здесь K_1 и K_2 наименьшие, что может свидетельствовать о незначительной подвижности КП в сравнении с другими рассмотренными системами, скорость перемещения полости как одного целого в объеме жидкости равна нулю $V_h = 0$. Полость рассасывается и всплывает.

Следовательно, данная система может быть применена для процессов направленных на продолжительное воздействие на объекты находящиеся в области, граничащей с электродами, либо для общего воздействия на жидкости.

Второй случай по своим характеристикам близок к первому, однако из-за большего времени схлопывания, данную систему можно применять для создания гидропотоков, направленных в стороны противоположные расширению полости. Полость также рассасывается и всплывает после серии пульсаций в приэлектродной области.

Система с конусной выемкой катодного электрода придает дополнительную подвижность полости. Поми-

мо пульсаций в приэлектродной области, КП перемещается в направлении заданном рефлекторной внутренней поверхностью электрода – катода $V_h = 0,9$ м/с. Коэффициенты $K_1 = 7,5$ и $K_2 = 7$, превышают в 3-4 раза аналогичные в ранее рассмотренных системах. Обеспечивается наибольший контраст в изменении скоростей расширения и схлопывания, быстрое расширение медленное схлопывание и большой перепад в размерах полости. Пульсации полости происходят уже на определенном расстоянии от разрядной области. Что может говорить о дополнительных преимуществах данного способа инициирования разряда и применения его для особых технологических процессов. Так можно направленно внедрять КП в детали сложной формы с труднодоступными местами для привычных способов обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена система электродов, одним из которых является катод с конусной выемкой. Данная система задает траекторию движения кавитационной полости и фокусирует образующиеся в результате разряда ударные волны. Результатом фокусировки являются большие перепады между максимальным и минимальным диаметром полости. Также проявляется контрастность в изменении скоростей расширения и схлопывания. Данная система может применяться как перемещающийся в объеме жидкости источник ударных волн. Выявленные свойства сфокусированных ударных волн требуют дальнейшего рассмотрения, с целью выявления возможных областей применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
- Тесленко В.С., Жуков А.И., Митрофанов В.В., Дрожжин А.П. Генерация и фокусировка ударно-акустических волн в жидкости многоочаговым электрическим разрядом // ЖТФ. – 1999. – Т.69. – В.4. – С. 138-140.
- Комисаров И.И., Островская Г.В., Филиппов В.Н., Шедова Е.Н. Генерация ударных волн в воде и в воздухе при воздействии сфокусированного излучения CO_2 лазера на свободную поверхность жидкости // ЖТФ. – 1997. – Т. 67. – № 2. – С. 138-140.
- Электрогидравлическая очистка. Электронный ресурс: http://shill.ucoz.ua/news/4_1_elektrogidravlicheskaia_ochistka/2010-11-06-71.
- Гидравлический удар. Электронный ресурс: <http://www.pppa.ru/effects/phenomenon/effects26.php>.
- Гасанов И.С., Гусейнов Э.К., Салманов В.М., Агаева А.А. Особенности электрического взрыва проводников жидкости // Проблемы энергетики. – 2003. – № 5.
- Юферов В.Б., Винников Д.В., Пономарев А.Н., Буравилов И.В., Муфель Е.В. Сравнительный анализ акустических импульсов от излучателей от излучателей милли- и микросекундного диапазонов // Вісник НТУ "ХПІ". Тематический выпуск "Техника и электрофизика высоких напряжений". – 2009. – № 11. – С. 185-189.
- Юферов В.Б., Винников Д.В., Буравилов И.В., Муфель Е.В., Пахомов А.Ю., Гарбуз В.В., Живанков К.И., Пономарев А.Н. Электрогидравлический метод обезгаживания вакуумируемых жидкостей // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – № 16. – С. 211-217.

Bibliography (transliterated): 1. Yutkin L.A. 'Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primenie v promyshlennosti. L.: Mashinostroenie, 1986. - 253 s. 2. Teslenko V.S., Zhukov A.I., Mitrofanov V.V., Drozhzhin A.P. Generaciya i fokusirovka udarno-akusticheskikh voln v zhidkosti mnogoochagovym elektricheskim razryadom //ZhTF. - 1999. - T.69. - V.4. - S. 138-140. 3. Komissarov I.I., Ostrovskaya G.V., Fillipov V.N., Shedova E.N. Generaciya udarnyh voln v vode i v vozduhe pri vozdeystvii sfokusirovannogo izlucheniya SO_2 lazera na svobodnyu poverhnost' zhidkosti // ZhTF. - 1997. - T. 67. - № 2. - S. 138-140. 4. 'Elektrogidravlicheskaia ochistka. Elektronnyj resurs: http://shill.ucoz.ua/news/4_1_elektrogidravlicheskaia_ochistka/2010-11-06-71. 5. Gidravlicheskiy udar. Elektronnyj resurs: <http://www.pppa.ru/effects/phenomenon/effects26.php>. 6. Gasanov I.S., Guseynov 'E.K., Salmanov V.M., Agaeva A.A. Osobennosti elektricheskogo vzryva provodnikov zhidkosti // Problemy energetiki. - 2003. - № 5. 7. Yuferov V.B., Vinnikov D.V., Ponomarev A.N., Buravilov I.V., Mufel' E.V. Sravnitel'nyj analiz akusticheskikh impul'sov ot izluchatelej ot izluchatelej milli- i mikrosekundnogo diapazonov // Visnik NTU "HPI". Tematicheskij vypusk "Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij". - 2009. - № 11. - S. 185-189. 8. Yuferov V.B., Vinnikov D.V., Buravilov I.V., Mufel' E.V., Pahomov A.Yu., Garbuz V.V., Zhivankov K.I., Ponomarev A.N. 'Elektrogidravlicheskiy metod obezgazhivaniya vakuumiruemyh zhidkostej // Visnik NTU "HPI". - 2011. - № 16. - S. 211-217.

Поступила 20.12.2012

Винников Денис Викторович, м.н.с.,
Озеров Александр Николаевич, м.н.с.,
Юферов Владимир Борисович, д.т.н.проф.
Национальный научный центр "ХФТИ"
61108, Харьков, ул. Академическая 1
тел. (057) 3356326, e-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

Сакун Александр Валерьевич, к.биол.н.,
Корытченко Константин Владимирович, к.т.н.
Национальный технический университет "ХПИ"
факультет военной подготовки
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076427, e-mail: entropia@rambler.ru

Месенко А.П.
инспектор Подольского РО ГУ Гостехногенбезопасность
04080, Киев, ул. Нижнеюрковская, 5
e-mail: mes14@ukr.net

Vinnikov D.V., Ozerov A.N., Yuferov V.B., Korytchenko K.V., Sakun A.V., Mesenko A.P.

Experimental investigation of electrical discharge in liquid initiated between cone channel electrodes.

This paper delves into electrical discharge in liquid between cone channel electrodes as applied to a problem of cavity initiation with shock waves focusing. The velocity of the cavitation pocket directed motion has been determined. Curves of the liquid transparency variation at 650 nm wave length have been obtained. Low pressure influence on acoustic signals under shock waves focusing has been evaluated.

Key words – electrical discharge in liquid, cone channel electrodes, cavity initiation, shock waves focusing, directed cavity motion.

ИНДУКЦИОННАЯ ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С КРУГОВЫМ ВИТКОМ С РАЗРЕЗОМ МЕЖДУ ДВУМЯ ТОНКОСТЕННЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЛИСТАМИ

В статті проведено дослідження електродинамічних процесів в системі з "незамкнутим одновитковим циліндричним витком" і двома паралельними плоскими тонкостенними провідниками, розташованими симетрично по обидві сторони витка. По отриманим аналітичним залежностям проведено числові оцінки і побудовані об'ємні епюри амплітудно-просторового розподілу густини індукованого струму і сил притягання, що збуджуються полем витка, з "розвивами" різної величини.

В статье проведено исследование электродинамических процессов в системе с "незамкнутым" одновитковым цилиндрическим витком и двумя параллельными плоскими тонкостенными проводниками, расположеными симметрично по обе стороны витка. По полученным аналитическим зависимостям проведены численные оценки и построены объемные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности индуцированного тока и сил притяжения, возбуждаемых полем витка, с "разрывами" различной величины.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Разработки разного рода технических систем для выравнивания заданных участков на поверхности тонкостенных листовых металлов инициированы, в основном, спросом на производственные операции по реставрации корпусов самолётов и кузовов автомобилей [1].

В первом случае необходимость такой операции обусловлена нарушением аэродинамических характеристик летательного аппарата, вплоть до потери устойчивости в полёте, во втором, не только эстетическими соображениями, но зачастую и просто невозможностью дальнейшей эксплуатации транспортного средства с повреждённым кузовом. В этой связи особый интерес представляют устройства, позволяющие производить реставрацию повреждений (вмятин) на поверхности с внешней стороны без разборки корпуса или кузова и, по возможности, без нарушения существующего защитного покрытия [2-5].

Анализ основных достижений и публикаций. Исключительно новые возможности для создания устройств по внешнему устраниению вмятин в кузовах легковых автомобилей открыло явление, экспериментально обнаруженнное в 2004 г. профессорами Национального Технического Университета "Харьковский политехнический институт" Батыгиным Ю.В., Лавинским В.И., Хименко Л.Т. [6]. Его суть состоит в том, что при частотах действующих полей ниже ~ 2 кГц имело место притяжение с образованием вмятины тонкой стальной пластины к рабочей поверхности индуктора-инструмента. При увеличении частоты до ~ 7 кГц и выше образец отталкивался с образованием выпуклости согласно традиционным представлениям о процессах при магнитно-импульсной обработке металлов.

Обнаруженное явление на основании феноменологических соображений и понимания происходящих процессов на уровне того времени позволило запатентовать "Способ магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов" [7], отличающийся от известных аналогов тем, что для притяжения заготовки к индуктору при использовании одного источника импульс-

ного поля частота действующего поля выбирается из условия низкочастотности [1, 5, 6]. Авторами работы [8] сформулированы физические основы перспективных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов и запатентовано другое решение по магнитно-импульльному притяжению, принцип действия которого основан на силовом взаимодействии проводников с одинаково направленными токами (закон Ампера) [9].

В дальнейшем, запатентованный в [9] "Способ магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов", как первое предложение подобного рода, лёг в основу создания "индукционных индукторных систем" (авторское название), различного конструктивного исполнения [10, 11].

Одним из наиболее важных вопросов при выборе определенной конструкции индукционной индукторной системы, является исследование в ней электродинамических процессов. Т.к. их характер и протекание в соответствии с конструктивными особенностями – определяют эффективность и работоспособность системы в целом.

Цель работы – исследование электродинамических процессов в системе с "незамкнутым" одновитковым цилиндрическим витком и двумя параллельными плоскими тонкостенными проводниками, расположеными симметрично по обе стороны витка.

РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Расчётная модель рассматриваемой системы приведена на рис. 1, где цилиндрический виток с разрезом для подключения к источнику мощности помещён между двумя тонкостенными листовыми металлами параллельно друг другу.

Постановка задачи.

1. Бесконечно протяжённые в поперечных направлениях идентичные листы толщиной – d выполнены из немагнитного металла с удельной электропроводностью – γ .

2. Виток индуктора расположен между листами на одинаковом расстоянии h до каждого из них, радиус витка – R , поперечные размеры настолько малы, что математически, расположение возбуждающего тока индуктора можно описать произведением дельта-функций Дирака $\sim \delta(z-h)\delta(r-R)$.

3. В местах соединения витка (соответствующие токопроводы перпендикулярны к его плоскости) и источника мощности имеет место "разрыв" по азимуту, описываемый функцией

$$f(\phi) = \eta(\phi - \phi_0) - \eta(\phi - (2\pi - \phi_0)), \quad (1)$$

где $\eta(\phi)$ – ступенчатая функция Хевисайда, $2\phi_0$ – величина "разрыва" в витке, выраженная в терминах азимутального угла.

4. По витку протекает азимутальный ток с плотностью $-j_{\phi}(p, r, \phi, z)$,

$$j_{\phi i}(t, r, \phi, z) = j(t) \cdot \delta(r - R) \cdot \delta(z - h) \cdot f(\phi), \quad (2)$$

где $j(t)$ – амплитудно-временная зависимость, t – время.

5. Временные характеристики возбуждающего тока таковы, что $\omega \cdot \tau \ll 1$, где ω – характерная циклическая частота сигнала, $\tau = \mu_0 \gamma \cdot d^2$ – характерное время диффузии в металлический лист [1, 5-7].

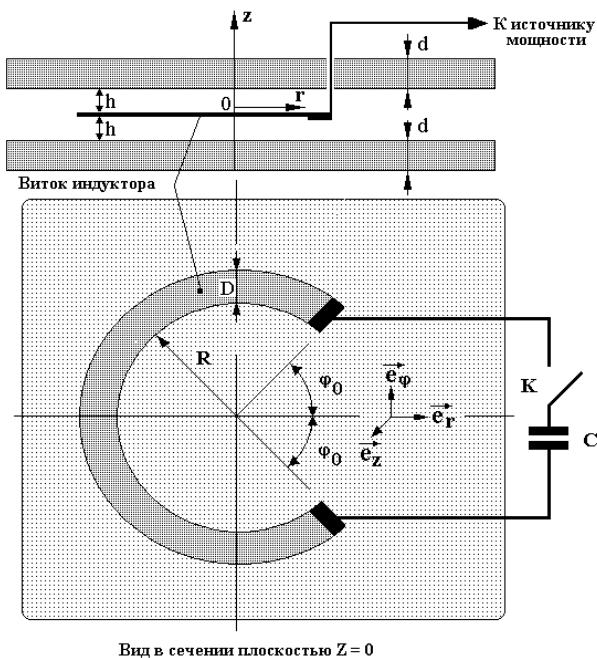


Рис. 1 "Незамкнутый" виток между тонкостенными металлами

Необходимо подчеркнуть, что допущение о форме возбуждающего тока с азимутальным разрывом первого рода исключает лишь влияние токоподводов к витку и не противоречит требованию непрерывности линий возбуждающего тока.

Первое. Токоподводы в практике магнитно-импульсной обработки металлов, как правило, перпендикулярны к его плоскости.

В таком конструктивном исполнении их влиянием на протекающие электромагнитные процессы действительно можно пренебречь.

Второе. Принимаемые в дальнейшем модели расчёта предполагают замкнутость линий возбуждающего тока в элементах разрядного контура, частью которого является и собственно виток, а не в пространстве между местами его подсоединения к источнику за счёт априори пренебрежимо малых токов смещения.

Согласно принятым допущениям в системе возбуждается электромагнитное поле с векторами напряжённости $\mathbf{E} = \{E_r \neq 0, E_\phi \neq 0, E_z \neq 0\}$ и $\mathbf{H} = \{H_r \neq 0, H_\phi \neq 0, H_z \neq 0\}$.

Не останавливаясь на математических операциях по интегрированию уравнений Максвелла, проделанных в [12], запишем аналитическую пространственно-временную зависимость для линейной плотности азимутальной составляющей тока, индуцированного низкочастотным магнитным полем "разомкнутого" витка индуктора в каждом из тонкостенных листовых металлов, полученную в [12].

$$\begin{aligned} J_{\phi}^{(2)}(t, r, \phi) = & -\frac{\tau \cdot R}{(8d^2)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \times \\ & \times \int_0^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\phi_0) \cdot [J_{n+1}(\lambda R) - J_{n-1}(\lambda R)] \times \\ & \times [J_{n+1}(\lambda r) - J_{n-1}(\lambda r)] \cdot e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cos(n\phi) d\lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$F_n(\phi_0) = \begin{cases} \left(-\frac{2 \cdot \sin(n \cdot \phi_0)}{\pi \cdot n} \right), & n \neq 0, \\ \left(1 - \frac{\phi_0}{\pi} \right), & n = 0. \end{cases}$$

$J_n(\lambda \cdot r)$ – функция Бесселя n -го порядка, λ – параметр преобразования.

Проведенное решение и формула (3) позволяет получить некоторое представление о пространственно-временном распределении возбуждаемых сил притяжения между проводниками с индуцированными токами (закон Ампера) с учётом влияния разреза в витке, то есть, нарушения аксиальной симметрии системы, на силовые процессы в индукционной индукторной системе.

Уточним, в данном случае речь идёт не о силах взаимодействия, вычисленных строго по закону Ампера, а о качественном представлении их распределения по пропорциональности квадрату индуцированных токов.

Отметим, что силы отталкивания здесь также имеют место, но, как было показано ранее в многочисленных авторских работах, их интегральное действие во времени будет стремиться к нулю [1, 5, 13, 14].

Итак, сила взаимного притяжения вспомогательного тонкостенного экрана и листовой заготовки в индукционных индукторных системах, соответствующих математической модели рис.1, нормированная на амплитудный множитель, соответствующий произвольному контуру протекания тока с радиусом $-r$, будет описываться следующей зависимостью

$$F_{attr}(r, \varphi) \sim \left[\int_0^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\varphi_0) \cdot [J_{n+1}(\lambda R) - J_{n-1}(\lambda R)] \times \right. \\ \left. \times [J_{n+1}(\lambda r) - J_{n-1}(\lambda r)] \cdot e^{-\lambda h} \frac{(1-e^{-\lambda d})}{\lambda} \cos(n\varphi) d\lambda \right]^2. \quad (4)$$

Примечание. Амплитудный множитель определяется

$$F_{max\ attr} = \left(\frac{\mu_0 J_m^2}{2} \right) \cdot \frac{r}{h}.$$

Результаты вычислений по формуле (4) приведены на рис. 2. Для сравнения на рис. 3 даны картины пространственного распределения возбуждаемых вихревых токов, взаимодействие которых инициирует силы притяжения.

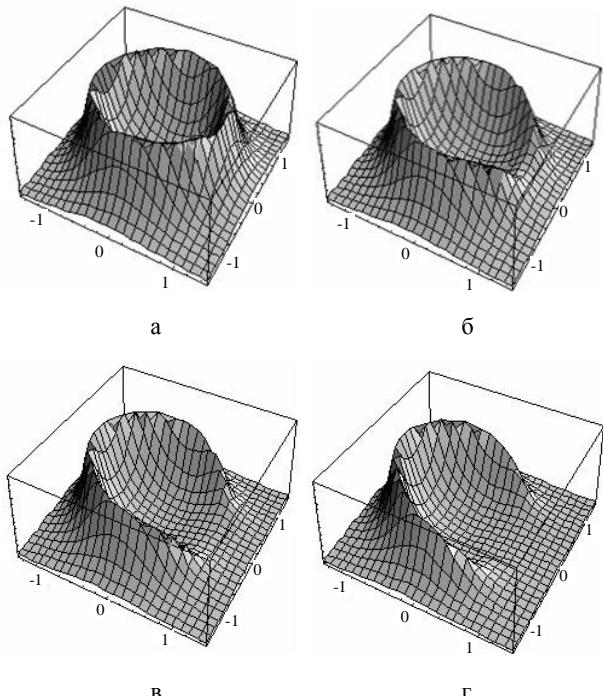


Рис. 2. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения сил притяжения, возбуждаемых полем витка, с "разрывами" различной величины
а) $\Theta=0.01$, б) $\Theta=0.1$, в) $\Theta=0.2$, г) $\Theta=0.3$

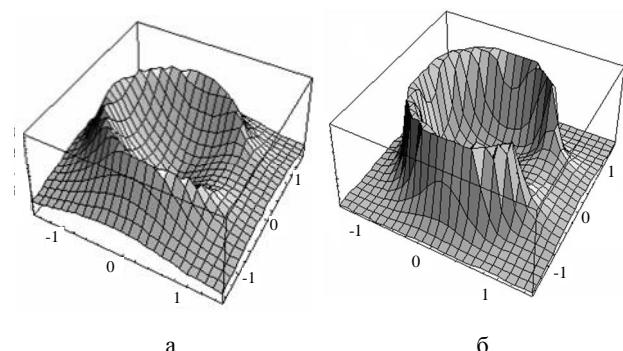


Рис. 3. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения модуля плотности тока, индуцированного витком с "разрывом", $\Theta=0.2$, а) в металле тонкостенного листа, б) на поверхности идеального проводника

ВЫВОДЫ

Выполненные оценки показали, что:

- наличие разреза в витке – источнике магнитного поля в индукционной индукторной системе приводит к искажению аксиальной симметрии в распределении возбуждаемых сил притяжения, эффект имеет место уже при величине разреза в 1% от длины окружности витка (рис. 2,а);

- увеличение разреза, зачастую необходимое по конструктивным соображениям, существенно искажает картину распределения действующих сил, и, как видно из эпюр на рис.2,б-г "провалы" в распределениях при величинах разрезов 10–30 % растут в квадратичной зависимости;

- последнее замечание подтверждается сравнением эпюры для силы на рис. 2,в и эпюры распределений индуцированного тока на рис. 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гнатов А.В. Прогрессивные технологии. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А.В. Гнатов, Ю.В. Батыгин, А.Н. Туренко. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 238 с.
- Гнатов А.В. Безконтактне магнітно-імпульсне рихтування автомобільних кузовів. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції ["Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій"]. (Тернопіль, 19-21 травня 2010 р.). – Тернопіль: Вісник ТДТУ, 2010. – Т. 15. – № 2. – С. 164-171.
- Експерименти по магнітно-імпульсному притяженню тонкостенних листових металів в автомобілестроєнні: 1-міжнародній Інтернет-конференції: ["Мехатроніка транспортних засобів і технологіческих машин"] (з 1.09.2010 р. по 30.11.2010 р.) Сборник статей 1-ї міжнародної Інтернет-конференції / Ю.В. Батигін, А.В. Гнатов. – Губкінський інститут (філіал) ГОУ ВПО "Московський державний відкритий університет" <http://gubkin.msu.ru>. Мехатроніка транспортних засобів і технологіческих машин, 2010. – С. 77-86.
- Прогрессивные магнитно-импульсные технологии на транспорте. Третя Міжнародна науково-практична конференція ["Сучасні інформаційні технології на транспорті" MINITT-2011]. У 2-х тт. Том 2. (Херсон, Україна 23-25 травня 2011 р.) / А.В. Гнатов. – Херсон: Херсонський державний морський інститут, 2011. – С. 232-239.
- Прогресивні технології в автотранспортних засобах / Ч. II: Фізичні основи магнітно-імпульсних технологій безконтактного рихтування кузовних елементів автомобіля: навчальний посібник / Ю.В. Батигін, А.В. Гнатов, І.С. Трунова, Є.А. Чаплігін. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 176 с.
- Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field: proceedings of the 1-st International Conference ["High Speed Metal Forming"], (Dortmund, March 31/April 1, 2004) / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko. – Dortmund, Germany, 2004. – P. 157-160.
- Пат. 75676 Україна, МПК B 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хіменко Л.Т.; заявитель и патентообладатель ХПІ. – №2004010512; заявл.23.01.04; опубл. 15.05.06, Бюл. №5.
- Батигін Ю.В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов / Ю.В. Батигін, В.І. Лавінський, Л.Т. Хіменко // Електротехніка і Електромеханіка. 2013. №1

- протехніка і електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 80-84.
9. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хавін В.Л.; заявитель и патентообладатель ХПІ. – №2004010542; заявл. 26.01.04; опубл. 15.02.06, Бюл. №2.
10. Пат. 31751 України, В 21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготівок методом притягання до індуктора / Батигін Ю.В., Бондаренко О.Ю., Чаплігин Є.О.; заявник та патентовласник Харківський нац. автому.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. №8.
11. Пат. 31752 України, В 21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготівок / Батигін Ю.В., Бондаренко А.Ю., Сериков Г.С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автому.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. №8.
12. Батигін Ю.В. Электромагнитные процессы в индукционной индукторной системе с круговым витком с разрезом между двумя тонкостенными металлическими листами / Ю.В. Батигин, А.В. Гнатов, Е.А Чаплыгин, Д.О. Смирнов // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С. 51-55.
13. Батигін Ю.В. Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с неферромагнитным массивным экраном и листовой заготовкой / Ю.В. Батигин, А.В. Гнатов // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 4. – С. 56-59.
14. Батигін Ю.В. Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с неферромагнитным массивным экраном и ферромагнитной листовой заготовкой / Ю.В. Батигин, А.В. Гнатов, С.А. Драченко, Т.В. Гаврилова // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 6. – С. 60-63.

Bibliography (transliterated):

1. Gnatov A.V. Progressivnye tehnologii. Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennih metallov impul'snymi magnitnymi polyami: monografiya / A.V. Gnatov, Yu.V. Batygin, A.N. Turenko. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. - 238 s.
2. Gnatov A.V. Bezkontaktnye magnitno-impul'sne rihtuvannya avtomobil'nih kuzoviv. Materiali mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii ["Fundamental'ni ta prikladni problemi suchasnih tehnologij"]. (Ternopil', 19-21 travnya 2010 r.). - Ternopil': Visnik TDTU, 2010. - T. 15. - № 2. - S. 164-171.
3. 'Eksperimenty po magnitno-impul'snomu prityazheniyu tonkostennih listovyh metallov v avtomobilestroeni: 1-mezhdunarodnoj Internet-konferencii: ["Mehatronika transportnyh sredstv i tehnologicheskikh mashin"] (s 1.09.2010 g. po 30.11.2010 g.) Sbornik statej 1-jj mezhdunarodnoj Internet-konferencii / Yu.V. Batigin, A.V. Gnatov. - Gubkinskij institut (filial) GOU VPO "Moskovskij gosudarstvennyj otkrytyj universitet" <http://gubkin.msu.ru>. Mehatronika transportnyh sredstv i tehnologicheskikh mashin, 2010. - S. 77-86.
4. Progressivnye magnitno-impul'snye tehnologii na transporte. Tretya Mizhnarodna naukovo-praktichna konferenciya ["Suchasni informacijni tehnologii na transporti" MINTT-2011]. U 2-h tt. Tom 2. (Herson, Ukraina 23-25 travnya 2011 r.) / A.V. Gnatov. - Herson: Hersons'kij derzhavniij mors'kij institut <<http://www.kmi.kherson.ua/>>, 2011. - S. 232-239.
5. Progresivni tehnologij v avtotransportnih zasobah / Ch. II: Fizichni osnovi magnitno-impul'snih tehnologij bezkontaktnogo rihtuvannya kuzovnih elementiv avtomobiliya: navchal'nij posibnik / Yu.V. Batigin, A.V. Gnatov, I.S. Trunova, C.A. Chaplygin. - Harkiv: HNADU, 2011. - 176 s.
6. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field:

proceedings of the 1-st International Conference ["High Speed Metal Forming"], (Dortmund, March 31/April 1, 2004) / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko. - Dortmund, Germany. 2004. - P. 157-160.

7. Pat. 75676 Україна, МРК В 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoi obrobki tonkostinnih metalevih zagotovok / Batigin Yu.V., Lavins'kij V.I., Himenko L.T.; zayavitel' i patentoobladatel' HPI. - №2004010512; zayavl.23.01.04; opubl. 15.05.06, Byul. №5. 8. Batygin Yu.V. Fizicheskie osnovy vozmozhnyh napravlenij razvitiya magnitno-impul'snoi obrabotki tonkostennyh metallov / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij, L.T. Himenko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2004. - № 2. - S. 80-84.

9. Pat. 74909 Україна, МРК В 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoi obrobki tonkostinnih metalevih zagotovok / Batigin Yu.V., Lavins'kij V.I., Havin V.L.; zayavitel' i patentoobladatel' HPI. - №2004010542; zayavl. 26.01.04; opubl. 15.02.06, Byul. №2.

10. Pat. 31751 України, В 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoi obrobki metalevih zagotovok / Batigin Yu.V., Lavins'kij V.I., Havin V.L.; zayavnik ta patentovlasnik Harkiv's'kij nac. avtom.-dorozhn. un-t. - № u200712252; zayavl. 05.11.2007; opubl. 25.04.08, Byul. №8.

11. Pat. 31752 України, В 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoi obrobki metalevih zagotovok / Batigin Yu.V., Bondarenko O.Yu., Chaplygin E.O.; zayavnik ta patentovlasnik Harkiv's'kij nac. avtom.-dorozhn. un-t. - № u200712252; zayavl. 05.11.2007; opubl. 25.04.08, Byul. №8.

12. Batigin Yu.V. 'Elektromagnitnye processy v indukcionnoj induktornoj sisteme s krugovym vitkom s razrezom mezhdu dvumya tonkostennymi metallicheskimi listami / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, E.A Chaplygin, D.O. Smirnov // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2012. - № 3. - S. 51-55.

13. Batigin Yu.V. Raschet elektrodinamicheskikh usilij v indukcionnoj induktornoj sisteme s neferromagnitnym massivnym ekranom i listovoj zagotovkoj / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 4. - S. 56-59.

14. Batigin Yu.V. Raschet elektrodinamicheskikh usilij v indukcionnoj induktornoj sisteme s neferromagnitnym massivnym ekranom i ferromagnitnoj listovoj zagotovkoj / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, S.A. Drachenko, T.V. Gavrilova // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2010. - №6. - S. 60-63.

Поступила 06.04.2012

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., доц.
Харьковский национальный автомобильно-дорожный
университет
кафедра автомобильной электроники
61002, Харьков, ул. Петровского 25
тел. (057) 7003852, e-mail: kalifus@yandex.ru

Gnatov A.V.

An induction inductor system with a circular turn with a cut between two thin-walled sheet metals.

Research on electrodynamical processes in a system with an open cylindrical single-turn coil and two parallel flat thin-walled conductors placed symmetrically on the both sides of the coil has been carried out in this article. On the basis of obtained analytical relations, numerical evaluations have been made and three-dimensional amplitude-space distribution diagrams of induced current density and attraction force generated by the coil field have been plotted for various-size discontinuity.

Key words – magnetic pulse metal working, induction inductor system, electrodynamical processes, 3D distribution diagrams, research.

ТЕНДЕНЦІЇ РАЗВИТИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рухомий склад, який знаходитьться в експлуатації на залізницях України, не оновлювався протягом багатьох років, що привело до значного технічного зносу електровозного і тепловозного парку країни. Одним з виходів із ситуації, що склалася, є проведення капітального ремонту з продовженням терміну служби локомотивів, які зможуть експлуатуватися протягом ще декількох років. При виконанні ремонту або модернізації, а також введення в дію нового рухомого складу, необхідно впроваджувати сучасні тягові електроприводи.

Подвижной состав, который находится в эксплуатации на железных дорогах Украины, не обновлялся в течение многих лет, что привело к большому техническому износу электровозного и тепловозного парка страны. Одним из выходов из сложившейся ситуации является проведение капитального ремонта с продлением срока службы локомотивов, которые смогут эксплуатироваться на протяжении еще нескольких лет. При выполнении ремонта или модернизации, а также ввода в действие нового подвижного состава, необходимо внедрять современные тяговые электроприводы.

На данный момент на большей части ТПС Украины используется коллекторные ТЭД. Они имеют свои общезвестные достоинства и недостатки. Но в связи с бурным развитием силовой электроники появилась возможность создавать и применять на подвижном составе высокоэффективные приводы переменного тока на основе асинхронного (синхронного) тягового электродвигателя и статических преобразователей частоты. Ведущие мировые производители железнодорожного транспорта Siemens, Alstom, Bombardier активно осваивают новые технические возможности, предоставляемые тяговым приводом переменного тока, и отказались от использования морально устаревших и неудобных в эксплуатации тяговых двигателей постоянного тока.

Использование асинхронного электропривода в локомотивах улучшает тяговые характеристики, повышает их надежность, а применение современных статических преобразователей частоты в тяговом электроприводе переменного тока позволяет легко реализовать "антиузовые" и "противобоксовые" алгоритмы управления поездом.

Широкое развитие тягового привода с использованием тяговых асинхронных трехфазных электродвигателей в 1980-е гг. значительно увеличило удельную мощность локомотивов.

Четырехосные электровозы серии 120 Государственных железных дорог Германии (DB AG), появившиеся в 1979 г., были первыми локомотивами с трехфазным асинхронным двигателем и рекуперативным торможением. После испытаний электровозов в 1984 г. было начато строительство серии 120.1 из 60 локомотивов, поставленных заказчику в 1987-1989 гг.

После этого для государственных железных дорог Дании (DSB) была построена партия электровозов подобного типа (серии EA 3000), а также несколько высокоскоростных поездов ICE1, концевые моторные вагоны которых фактически представляли собой отдельные электровозы с тяговым приводом электровоза серии 120.

В 1980-х гг. в цепях управления все чаще стали применяться микропроцессорные схемы. Они обладали компактностью и повышенной надежностью. В этот же период в Японии был изобретен запираемый тиристор (GTO), позволивший значительно упростить схемы тяговых преобразователей.

Компания BBC (Дания) на базе имевшихся запираемых тиристоров с рабочим напряжением 2500 В разработала тяговый преобразователь для первого электровоза с промежуточным звеном на напряжение 1400 В. Начиная с 1987 г., железнодорожной компании BT/SZU в Швейцарии было поставлено 8 электровозов серии Re450, разработанных на базе этого преобразователя, а с 1989 г. – 115 таких же локомотивов для Федеральных железных дорог Швейцарии (SBB) и городской железной дороги в Цюрихе.

11 июля 2000 г. совместно фирмами ADtranz и DB Cargo был представлен локомотив серии 185 как перспективный массовый мощный электровоз для грузовых перевозок. После проведения испытаний на трех опытных экземплярах (электровозы BR185 № 001-003), начиная с 2001 г., было заказано порядка 400 электровозов BR185, их применение позволило осуществлять грузовые перевозки не только по Германии, Австрии, Швейцарии и Швеции, где напряжение в контактной сети составляет 15 кВ, 16,67 Гц, но и по дорогам Франции, Люксембурга, Дании, Венгрии и Чехии, где напряжение в контактной сети – 25 кВ, 50 Гц.

Сделан важный шаг по созданию локомотивов нового поколения с бесколлекторными тяговыми двигателями и в Российской Федерации. С 1998 по 2006 г. НЭВЗ построил серию из 12 пассажирских шестиосных электровозов ЭП10 двойного питания (25 кВ переменного тока 50 Гц и 3 кВ постоянного тока). Электровозы этой серии отличаются высокой мощностью, хорошей динамикой разгона, а также улучшенными энергетическими показателями. На всех локомотивах установлено оборудование для рекуперации, система автоматического управления тягой и рекуперативно-реостатный тормоз, трехуровневая микропроцессорная система диагностики, асинхронные ТЭД, последние, по оценкам специалистов, показали результат лучше иностранных аналогов по ряду ключевых значений. Электрооборудование поставляется компанией Bombardier.

Электровоз ЭП20 – двухсистемный пассажирский электровоз, созданный НЭВЗ совместно с французской компанией Alstom. Он запланирован как головной проект масштабной программы для разработки семейства российских электровозов нового поколения.

ЗАО "Трансмашхолдинг" и ОАО "Российские железные дороги" заключили контракт на поставку в 2012–2020 гг. 200 двухсистемных пассажирских электровозов ЭП20.

ЭП20 – первый российский электровоз, способный водить пассажирские поезда на скоростях до 200 км/ч. Он имеет асинхронные тяговые двигатели ДТА-1200А с короткозамкнутым ротором (табл. 1, рис. 1) и тяговые преобразователи с IGBT-транзисторами. Кроме того, применен ряд других современных конструктивных решений – дисковые тормоза, цельнокатаные колеса, безмасляные компрессоры, электронные тормозные краны, системы безопасности для обеспечения вождения в "одно лицо", светодиодные прожекторы и фонари, модульная кабина управления со встроенными модулями энергопоглощения при столкновении и пр.

Таблица 1
Характеристики двигателя ДТА-1200А

Параметр	Значение
Часовая мощность, кВт	1200
Продолжительная мощность, кВт	1100
Ток трехфазный часового режима, А	390
Продолжительная частота вращения, об/мин	1766
Максимальная частота вращения, об/мин	3650
КПД, %	96

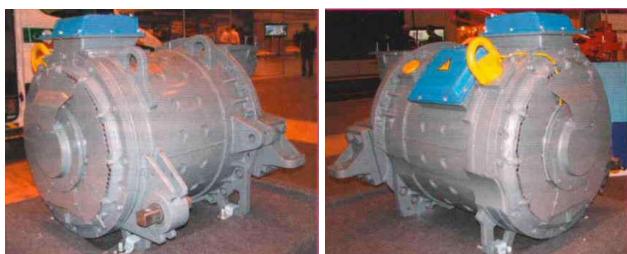


Рис. 1. Асинхронный тяговый электродвигатель ДТА-1200А с короткозамкнутым ротором

Отдельно стоит остановиться на моторно-редукторном блоке привода 3-го класса концепции GEALAF. Основной конструктивной особенностью такого механического привода является соединение вала двигателя с валом-шестерней редуктора посредством упругой мембранный муфты, компенсирующей перекосы этих валов. При этом двигатель имеет только одну собственную подшипниковую опору ротора, а второй вращающейся опорой является вышеуказанная мембрана муфты.

Реализуемые технические решения позволят в несколько раз сократить объем технического обслуживания, увеличить межремонтные пробеги, а также обеспечить экономию электроэнергии. Инновационные электровозы будут также производиться на Новочеркасском электровозостроительном заводе.

В 2012-2013 гг. 36 локомотивов будут переданы ОАО "РЖД" для организации пассажирских перевозок на маршруте Москва – Сочи, в том числе в период проведения Зимних Олимпийских игр 2014 г.

Электровоз 2ЭС5 – магистральный грузовой электровоз переменного тока пятого поколения, разрабатываемый совместно НЭВЗ (ТМХ) и французской компанией Alstom для ОАО "Российские железные дороги". Локомотив создается как один из элементов нового семейства российских электровозов, построенных по принципу единой базовой платформы. Унификация узлов и элементов с головным проектом – двухсистемным пассажирским электровозом ЭП20 запланирована на уровне 75%.

Электровоз 2ЭС10 "Гранит" – грузовой двухсекционный восьмиосный магистральный электровоз постоянного тока с асинхронным тяговым приводом. Электровоз выпускается в городе Верхняя Пышма Свердловской области ООО "Уральские локомотивы", совместным предприятием немецкого концерна Siemens и ЗАО "Группа Синара" на базе Уральского завода железнодорожного машиностроения, с 2011 г. ОАО "РЖД" в мае 2010 года подписан контракт на закупку 221 такого электровоза на сумму 42 млрд. руб.

На момент создания электровоз являлся самым мощным локомотивом для колеи 1520 мм. При стандартных весовых характеристиках он способен водить поезда весом примерно на 40-50% больше, чем электровозы серии ВЛ11. Планируется, что при применении "Гранита" на участках с тяжелым горным профилем появится возможность пропуска транзитных поездов весом от 7000 т без разделения состава и отцепки локомотива. Также обсуждается возможность выпуска 2ЭС10 в трехсекционном исполнении, что позволит внедрить технологию вождения тяжеловесных поездов весом 9000 т.

В созданную "Уральскими локомотивами" базовую платформу электровоза "Гранит" интегрированы современные разработки компании "Siemens" в области электропривода – блок вспомогательных трансформаторов, дроссель входного фильтра, блок охлаждения, тяговый преобразователь, тяговый двигатель и интегрированный редуктор. Комплектующие и модули для электровоза поставляют более 100 российских предприятий. Они обеспечивают завод электронными системами, тормозным, вспомогательным и пневматическим оборудованием, оборудованием для кабины, заготовками для колесных пар и т.д.

В ЗАО "Трансмашхолдинг" будет создаваться межрегиональный электропоезд с двухэтажными вагонами. Электропоезд будет включать в себя две тяговые секции (в голове и хвосте поезда), а также от 6 до 12 двухэтажных пассажирских вагонов. Тяговые секции будут представлять собой однокабинные четырехосные электровозы постоянного тока мощностью по 4000 кВт каждый. Они будут иметь асинхронный тяговый привод, микропроцессорную систему управления, элементы пассивной безопасности и другие современные системы. Внешний вид тяговых секций гармонично сочетается с

двуэтажными вагонами электропоезда. Максимальная скорость электропоезда составит 160 км/ч. Тяговые секции электропоезда будут производиться Новочеркасским электровозостроительным заводом (НЭВЗ). Пассажирские вагоны станут выпускаться Тверским вагоностроительным заводом (ТВЗ). Там же будут выполнятьсястыковка вагонов с тяговыми секциями и окончательная наладка поезда для передачи заказчику. Предполагается участие в проекте стратегического партнера холдинга – фирмы "AlstomTransport", а также других российских и зарубежных компаний. Также НЭВЗ выпустил и промышленные четырехосные электровозы НПМ2 постоянного тока 1,5 кВ с асинхронными тяговыми двигателями для Магнитогорского металлургического комбината.

Украина также имеет опыт создания и эксплуатации современного электровоза с асинхронным электроприводом. Днепропетровским электровозостроительным заводом совместно с фирмой Siemens был разработан и запущен в серийное производство современный электровоз с асинхронным электроприводом ДС3.

Тяговые двигатели для электровоза ДС3 были спроектированы и изготовлены ОАО "НПП Смелянский электромеханический завод", а полупроводниковые статические преобразователи и система управления – компанией "Siemens".

Технические возможности и опыт проектирования тяговых асинхронных двигателей имеет также харьковский ГП завод "Электротяжмаш".

Опыт эксплуатации данных электровозов показал, что требуются значительные затраты, связанные с обслуживанием импортного оборудования. Для того чтобы при модернизации и строительстве новых электровозов было выгодно применение асинхронного тягового электропривода, требуется использование частотных преобразователей отечественного производства, что позволит снизить стоимость самого оборудования, уменьшить затраты и время на его обслуживание.

На участках железных дорог Укрзализныци пригородные пассажирские перевозки выполняются дизель-поездами ДР-1А, ДР-1П (Латвия), дизель-поездами Д1 (Венгрия), поездами ДПМ1, ДПЛ1 с тепловозом М62 и ДПЛ2, ДТ116 с тепловозом 2ТЭ116 (Украина), кроме того, для этих целей используются маневровые тепловозы ЧМЭ3. Эксплуатация таких дизель-поездов экономически нецелесообразна и не отвечает требованиям рынка услуг пригородных пассажирских перевозок.

В соответствии с Государственной Программой развития рельсового подвижного состава, по заказу Укрзализныци, в Украине создан отечественный дизель-поезд ДЭЛ-02 с асинхронным тяговым электроприводом (АТП) и микропроцессорной системой управления. Заводом-изготовителем дизель-поездов является ПАО ХК "Лугансктепловоз", а основными исполнителями по тяговому электроприводу – ГП завод "Электротяжмаш", г. Харьков (тяговые двигатели), ОАО НИИ "Преобразователь", г. Запорожье (преобразователи частоты тяговые и собственных нужд), НТУ "ХПИ" и УкрГАЖТ, г. Харь-

ков (микропроцессорная система управления с отладочным комплексом).

Применение АТП повышает коэффициент сцепления на 25-30% за счет жестких электромеханических характеристик асинхронных двигателей и примерно в 2 раза снижает эксплуатационные затраты за счет отсутствия коллектора в тяговых двигателях. По оценкам специалистов, технический уровень дизель-поездов ДЭЛ-02 будет отвечать мировому уровню на ближайшие 8-10 лет.

Структурная схема АТП дизель-поезда ДЭЛ-02 включает: тяговый синхронный генератор, приводимый во вращение дизелем, тяговые преобразователи частоты, тяговые асинхронные двигатели, тормозной резистор и преобразователь собственных нужд.

В настоящее время на Одесской железной дороге в депо Христиновка эксплуатируются четыре опытных образца дизель-поезда ДЭЛ-02, а ПАО "Лугансктепловоз" приступил к их серийному производству.

Разработанный в Украине электровоз ДС3 предназначен для работы с грузовыми и пассажирскими поездами, имеет осевую формулу 2о-2о, мощность в продолжительном режиме на валах тяговых асинхронных электродвигателей 4800 кВт, конструкционную скорость 160 км/ч в пассажирском режиме и средний ресурс до капитального ремонта 2700 тыс. км пробега. Высокая осевая мощность, достаточно большое передаточное отношение редуктора, определяемое родом службы электровоза и высокой частотой вращения тягового электродвигателя, а также большие межремонтные пробеги потребовали при проектировании тяговой передачи разработку и внедрение ряда решений, не имеющих аналогов в локомотивостроении стран СНГ.

Стремление исключить сложный коллекторно-щеточный узел двигателей постоянного тока привело также к стимулированию развития синхронных тяговых электродвигателей. В конце 60-х годов СССР опережал зарубежных разработчиков в этой области. В дальнейшем, ведущие фирмы достигли значительных успехов в этом направлении. Кроме прогресса во внедрении IGBT транзисторов расширилось производство новых магнитных материалов и уменьшилась их стоимость. Это способствовало развитию приводов с частотно-регулируемыми синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ). Применение постоянных магнитов в синхронных двигателях исключает щетки и контактные кольца. Это облегчает ротор и дает возможность для повышения его частоты вращения.

Мировой рекорд скорости – 574,8 км/ч установлен в 2007 году опытными электропоездами с СДПМ фирмы "Альстом". По сравнению с асинхронными двигателями СДПМ имеет более высокий КПД на 1,5...2% благодаря отсутствию электрических потерь в роторе, лучшее соотношение максимальной полезной мощности и массы и повышенные динамические характеристики.

Перечисленные преимущества СДПМ позволяют реализовать непосредственный безредукторный при-

вод. При этом снижается общая масса тележки, повышается ее надежность и эффективность, а также уменьшаются затраты всего жизненного цикла. Тяговый преобразователь для питания СДПМ, по существу, такой же как и для питания тяговых вентильных и асинхронных машин.

Серийное производство генераторов и двигателей с ПМ мощностью 200 -1400 кВт возможно уже сегодня. Тяговые приводы с ПМ помогают повысить энергетическую эффективность электрических и дизель-электрических локомотивов. Это способствует, в свою очередь, сокращению потребляемой электроэнергии и расхода топлива, а также уменьшению выбросов CO₂ в окружающую атмосферу.

Односекционные восьмиосные локомотивы ЭП200 с применением тягового привода переменного тока с синхронными (вентильными) двигателями созданы на ОАО ХК "Коломенский завод" в сотрудничестве с организациями-соисполнителями: ОАО "ВЭлНИИ" (главное предприятие по разработке электрооборудования), ОАО "НПО НЭВЗ" (г. Новочеркасск), ВНИИЖТ, ОАО "Электропривод" (г. Саранск) и ОАО "Трансформатор". Новый электровоз и его модификация ЭП201 мощностью 8000 кВт предназначены для вождения пассажирских поездов составностью 20-24 вагона на сети дорог переменного тока напряжением 25 кВ, 50 Гц с максимальными скоростями движения соответственно 200 и 160 км/ч. Эти машины полностью унифицированы, за исключением тяговых редукторов, имеющих разные передаточные отношения.

Выбор этого типа привода определялся возможностью изготовления тяговых полупроводниковых преобразователей на отечественной элементной базе, большей простотой и меньшей стоимостью по сравнению с асинхронным тяговым электроприводом. Кроме того, специалисты ВЭлНИИ и ВНИИЖТа обладали определенными наработками в синхронном тяговом электроприводе, что облегчило его создание. Следует отметить, что аналогичное оборудование было успешно внедрено фирмой "Альстом" на французских скоростных поездах TGV, а также на локомотивах и электропоездах, поставляемых в другие страны.

При проведении во ВНИИЖТе приемочных испытаний было установлено, что некоторые параметры электровоза ЭП200 имеют более высокие значения, чем предусмотрены в техническом задании. Так, мощность продолжительного режима составила 7800 вместо 7200 кВт, часового – 8100 вместо 8000 кВт. Сила тяги продолжительного режима достигла 23,3 тс (вместо заданных 22 тс). Аналогичный показатель часового режима составил 26 тс вместо 24 тс.

ВЫВОДЫ

Украинские производители к настоящему моменту наравне с ведущими российскими и западными фирмами готовы создать и освоить серийное производство современного тягового электропривода переменного тока, не уступающего по техническим характеристикам и показателям надежности лучшим мировым образцам, а по стоимостным показателям и превзойти европейские компании при строительстве новых и модернизации существующих электровозов.

Это позволит Укрзализыце значительно уменьшить затраты на эксплуатацию подвижного состава с АТД по сравнению с затратами на подвижной состав с электроприводами на основе постоянного тока или на применение современных приводов переменного тока импортного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучумов В.А., Нестрахов А.С., Княжева А.С. Синхронные тяговые двигатели на постоянных магнитах. – Локомотив. – 2008. – № 7. – С. 35-37.
2. Белоцерковский О.В., Буряковский С.Г., Мастепан А.Г. Современный асинхронный электропривод для магистральных электровозов". – Локомотив-Информ. – 2011. – № 8. – С. 11-15.

Bibliography (transliterated): 1. Kuchumov V.A., Nestrafov A.S., Knayzheva A.S. Sinhronnye tyagovye dvigateli na postoyannyyh magnitah. - Lokomotiv. - 2008. - № 7. - S. 35-37. 2. Belozerkovskij O.V., Buryakovskij S.G., Mastepan A.G. Sovremennyj asinchronnyj `elektroprivod dlya magistral'nyh `elektrovozov". - Lokomotiv-Inform. - 2011. - № 8. - S. 11-15.

Поступила 06.11.2012

Устенко Александр Викторович, д.т.н.

Пасько Ольга Владимировна, к.т.н., доц.

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

Механический факультет

61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7

e-mail: zamdek@kart.edu.ua, тел. (057) 730-10-20

Ustenko A.V., Pasko O.V.

Development trends for rolling stock traction motors.

Rolling stock on the railways of Ukraine has not been updated for many years, which has led to significant wear of the country electric and diesel locomotive fleet. A way out of the existing situation is execution of major overhaul with extension of locomotive life to allow their operation for several more years. Repair or upgrading as well as putting new rolling stock into operation must be accompanied by implementation of state-of-the-art traction electric drives.

Key words – asynchronous traction electric drive, traction electric motor, rolling stock development.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СЕТЕЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

У статьї запропонована структура системи компенсації реактивної потужності при наявності вищих гармонік, що виникають як з боку зовнішнього джерела щодо вводу підприємства, так і з боку самого підприємства. Ефективність застосування методики вибору параметрів системи компенсації реактивної потужності за наявності гармонійних викривлень в напрузі і струмі підтверджується експериментальними дослідженнями на промисловому підприємстві.

В статье предложена структура системы компенсации реактивной мощности при наличии высших гармоник, возникающих как со стороны внешнего источника относительно ввода предприятия, так и со стороны самого предприятия. Эффективность применения методики выбора параметров системы компенсации реактивной мощности при наличии гармонических искажений в напряжении и токе подтверждается экспериментальными исследованиями на промышленном предприятии.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с интенсивным распространением полупроводниковой преобразовательной техники одной из наиболее важных задач повышения качества электроэнергии является уменьшение влияния высших гармоник на работу электрооборудования, прежде всего наиболее уязвимых в этом отношении конденсаторных батарей (КБ).

В настоящее время все большее внимание уделяется разработке технических средств компенсации высших гармоник, основанных на применении силовой преобразовательной техники. Такие средства позволяют не только повышать качество электроэнергии в электрических сетях, но и с высоким быстродействием управлять потоками реактивной мощности. Активные фильтры, например, позволяют повышать коэффициент мощности сети и компенсировать гармонические искажения в напряжении и токе. Однако, отсутствие конструкций, удовлетворяющих условиям их работы в сетях 6-10 кВ, высокая цена и малая информативность об электромагнитной совместимости с уже установленными на предприятиях КБ, приводят к поиску решения задачи уменьшения уровня высших гармоник на основе более простых и менее дорогостоящих устройств и способов. Конструкцию частотных электроприводов комплектуют таким образом, чтобы искажения в питающей сети были минимальны и удовлетворяли требованиям ГОСТ. В этом случае недостаток заключается в высокой стоимости такого оборудования. Кроме этого, отсутствие исследований по влиянию высших гармоник, создаваемых преобразователями частоты, на сам электропривод может негативно сказываться на характеристиках его работы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является разработка структуры системы компенсации реактивной мощности на основе новых алгоритмов и методов снижения влияния высших гармоник на конденсаторные установки с учетом различных условий возникновения гармонических искажений.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выборе способа снижения влияния высших гармоник на КБ необходимо, прежде всего, проанализировать источник и природу их возникновения. Природа возникновения высших гармоник зависит от факторов, обусловленных работой электрооборудования как во внешней сети относительно ввода предприятия, так и в сети самого предприятия. На схеме замещения электрической сети для расчета значений высших гармоник внешний источник искажений относительно ввода предприятия обычно представляется совокупностью источников напряжения частотами от 1 до n (U_0, U_3, \dots, U_n). Аналогично, источниками тока замещается нелинейная нагрузка самого предприятия, работа которой приводит к возникновению высших гармоник (I_0, I_3, \dots, I_n). Обобщенная схема замещения, объединяющая представленные выше варианты, показана на рис. 1, где LH – эквивалентная линейная нагрузка предприятия, X_s – сопротивление системы.

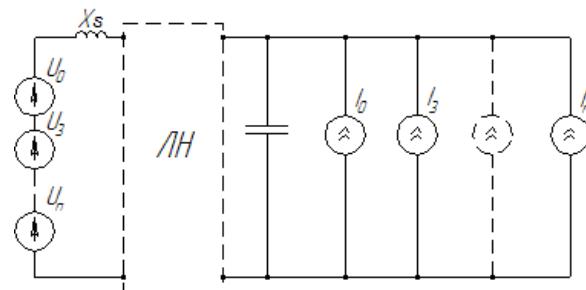


Рис. 1. Обобщенная схема замещения
для расчета высших гармоник

В зависимости от факторов возникновения высших гармоник должен быть выбран метод снижения влияния высших гармоник на работу КБ. В случае применения активных фильтров и ФКУ природа возникновения высших гармоник практически не влияет на выбор их параметров.

В работе [1] рассмотрены методы и алгоритмы компенсации гармонических искажений при различ-

ных условиях возникновения искажений как раз исходя из условий простоты реализации и отсутствия дорогостоящих элементов силовой преобразовательной техники. Предлагается проводить выбор параметров компенсирующих устройств в зависимости от мощности нагрузки, КБ, спектрального состава высших гармоник, а также параметров электрической сети для обеспечения работы конденсаторов без перегрузок токами высших гармоник при условии максимального коэффициента мощности сети. В условиях сложных разветвленных электрических сетей с резко-переменной электрической нагрузкой такой способ не всегда выполним. Однако, на предприятиях с неизменной нагрузкой, например, обогатительных фабриках, нефтеперерабатывающих заводах, для ограничения уровня высших гармоник на конденсаторах такой способ следует применять в первую очередь.

Другой способ ограничения уровня высших гармоник основан на изменении амплитудно-частотной характеристики узла сети относительно КБ путем размещения в электрической сети дополнительных реакторов. В этом случае важную роль играют факторы возникновения высших гармоник исходя из наличия нелинейной нагрузки в сети исследуемого электротехнического комплекса, либо во внешней сети относительно ввода предприятия.

На основе разработанных в [1] алгоритмов выбора мощности КБ и выбора параметров дополнительных устройств для снижения влияния высших гармоник на компенсирующие устройства был синтезирован алгоритм, позволяющий проводить выбор структуры системы компенсации реактивной мощности с применением КБ, обеспечивающий при этом ограничение уровня гармонических искажений до допустимых ГОСТ пределов (рис. 2).

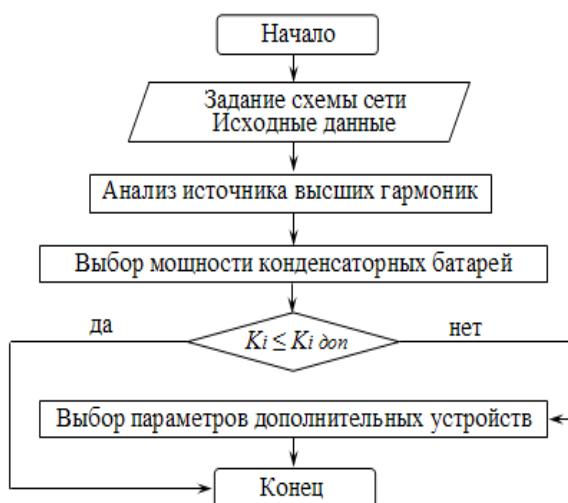


Рис. 2. Алгоритм выбора структуры системы компенсации реактивной мощности, где Ki – коэффициент перегрузки, Ki – допустимый коэффициент перегрузки

Структура содержит:

1. Исследование схемы электрической сети с определением диапазона возможного варьирования

нагрузки предприятия.

2. Исследование условий возникновения высших гармоник в напряжении и токе и их спектральный анализ.

3. Последовательность выбора средств компенсации высших гармоник с усложнением конфигурации системы компенсации реактивной мощности до тех пор, пока не будут обеспечены условия максимального коэффициента мощности сети и электромагнитной совместимости всех элементов комплекса.

В качестве критерия выбора дополнительных устройств были выбраны капитальные затраты на электрооборудование при условии обеспечения нормативных показателей функционирования КБ и электромагнитной совместимости работы электрооборудования. Капитальные затраты являются объективным показателем эффективности при сравнении различных вариантов оборудования. Простейшей конфигурацией средств снижения уровня высших гармоник на конденсаторах является подбор мощности КБ. Капитальные затраты на электрооборудование при таком способе отсутствуют, либо возникают только в том случае, если необходимо увеличивать мощность конденсаторной установки. Однако это нецелесообразно, так как в этом случае происходит перекомпенсация реактивной мощности, что приводит к увеличению суммарных потерь мощности и энергии в электрической сети. Последовательность отбора дополнительных устройств в составе структуры системы компенсации реактивной мощности определяется следующим образом: выбор мощности КБ; варьирование сопротивления системы; совместное изменение мощности КБ и сопротивления системы; размещение дополнительных реакторов; установка дополнительных реакторов с варьированием мощности КБ и сопротивления системы; применение фильтрокомпенсирующих устройств и активных фильтров.

Эффективность разработанного алгоритма подтверждается экспериментальными исследованиями на промышленном предприятии в Ленинградской области РФ. В электрической сети предприятия установлены регулируемые КБ мощностью 600 квар, на работу которых значительное влияние оказывают гармонические искажения, возникающие со стороны внешнего источника относительно ввода предприятия.

С помощью анализатора качества электроэнергии Fluke 43B был получен спектральный состав тока на КБ, представленный на рис. 3.

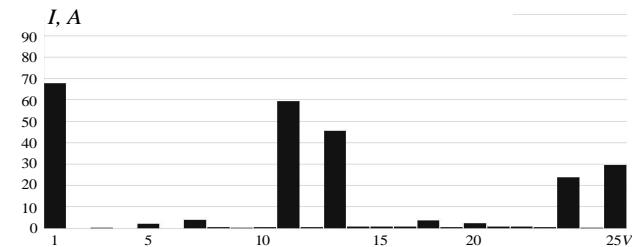


Рис. 3. Спектральный состав тока на КБ, где I – действующее значение тока, v – порядок гармоник

Перегрузка КБ токами высших гармоник достигает 70 %, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 13 %.

Согласно разработанной структуре системы компенсации реактивной мощности при наличии гармонических искажений был осуществлен последовательный выбор средств снижения уровня высших гармоник. Однако варьирование мощности КБ не приводит к требуемому результату. Тогда на следующем этапе разработанной структуры предполагается разместить реактор на входе сети. По результатам математического моделирования, согласно соответствующей схеме замещения, была построена зависимость коэффициента перегрузки КБ от мощности компенсирующих устройств и сопротивления системы, представленная на рис. 4, где X_{p1} – сопротивление дополнительно размещенного реактора на входе сети предприятия.

Из графиков видно, что коэффициент перегрузки (K_{nep}) компенсирующих устройств при заданном диапазоне изменения мощности нагрузки и КБ заметно снижается при увеличении сопротивления дополнительного реактора на входе электрической сети. Увеличение сопротивления реактора осуществляется исходя из условия поддержания допустимых уровней напряжения в электрической сети.

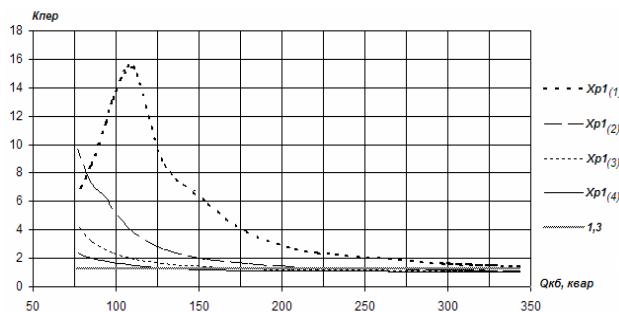


Рис. 4. Зависимость коэффициента перегрузки КБ от величины компенсированной реактивной мощности

По методу варьирования были определены параметры реактора X_{p1} , обеспечивающие соответствие коэффициента перегрузки КБ нормативному значению. На предприятии был изготовлен и установлен реактор на входе электрической сети.

В результате применения дополнительного реактора перегрузка КБ снизилась до 20 %, что подтверждает спектральный состав тока на КБ, полученный после установки реактора (рис. 5). Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составил около 5 %.

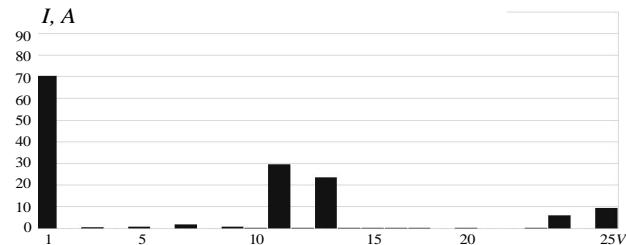


Рис. 5. Спектральный состав тока на КБ после установки реактора

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанный алгоритм выбора структуры системы компенсации реактивной мощности при наличии высших гармоник обеспечивает соответствие величины коэффициента перегрузки КБ нормативному значению при условии эффективной компенсации реактивной мощности и соблюдении электромагнитной совместимости работы электротехнического комплекса, выраженной, прежде всего, в поддержании допустимых уровней напряжения в электрической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скамын А.Н. Алгоритмы выбора средств компенсации высших гармоник в сетях горного предприятия // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 2012. – № 8. – С. 44-48.

Bibliography (transliterated): 1. Skam'in A.N. Algoritmy vybora sredstv kompensacii vysshih garmonik v setyah gornogo predpriyatiya // Izvestiya VUZov. Gornyj zhurnal. - 2012. - № 8. - S. 44-48.

Поступила 23.10.2012

Шклярский Ярослав Элиевич, д.т.н., профессор
Скамын Александр Николаевич, к.т.н.

Национальный минерально-сырьевый университет "Горный"
кафедра электротехники, электроэнергетики, электромеханики
199106, Россия, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2
тел. 8 (812) 3288667, e-mail: askamin@yandex.ru

Shklyarskiy Y.E., Skamin A.N.

Industrial research into high harmonic influence on compensation devices.

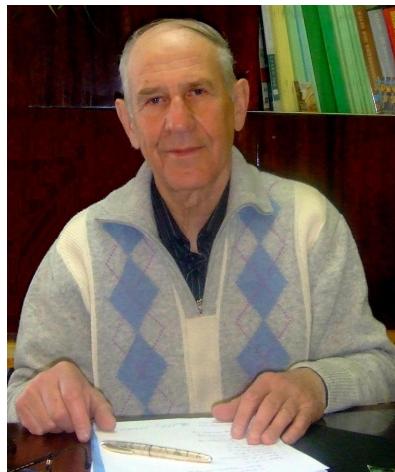
This work introduces the structure of a reactive power compensation system under high harmonics arising from both external nonlinear load and internal nonlinear load of an industrial enterprise. The efficiency of the system parameters definition algorithm in the presence of high harmonics is verified with experimental research at an industrial enterprise.
Key words – high harmonics, overload factor, condenser batteries, reactive power, nonlinear load, quality of electric power.

МИХАЙЛОВ ВАЛЕРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

(К 70-летию со дня рождения)

Валерий Михайлович родился 7 января 1943 года в городе Ижевске. С 1944 года и по настоящее время проживает в городе Харькове. Окончив в 1957 году семь классов школы, поступил учиться в Харьковский электромеханический техникум по специальности «Электрические аппараты». На протяжении всего обучения опытные педагоги не только давали фундаментальные знания, но и прививали любовь к этим предметам, умение учиться и желание постигать новые горизонты науки. Именно в это время под руководством талантливого педагога Суламифь Иосифовны Шульман в нем формируются базовые качества исследователя. После окончания техникума в 1961 году и поступления на специальность «Электрические машины и аппараты» электромашиностроительного факультета ХПИ, судьба Валерия Михайловича на многие десятилетия неразрывно переплелась с Харьковским политехническим институтом. Параллельно с освоением общеобразовательной программы становление Валерия Михайловича как исследователя проходило в студенческом научном кружке, организованном профессором Михаилом Абрамовичем Любчиком. В нем будущий ученый перенимал принципы организации научной деятельности, методологические аспекты электротехнической науки, методы и формы исследовательской работы, и, конечно, реализовывал свои первые исследовательские проекты. В результате кропотливого труда, начало которого было заложено в те годы, сформировалась целостная картина восприятия электромагнитных процессов и явлений, а также накопился громадный математический аппарат, позволивший в дальнейшем анализировать широкий круг проблем электротехники. Даже краткая характеристика студенческих лет невозможна без упоминания о спортивных достижениях, которые давали силы для неустанной интеллектуальной работы. Упорные тренировки по греко-римской борьбе и волевой характер позволили стать Валерию Михайловичу чемпионом ХПИ и прочири ему большие перспективы в спорте. Тем не менее, выбирая между спортивной карьерой и наукой, предпочтение было отдано последней. В 1964 году в рядах стройотряда участвовал в возведении хозяйственных помещений в Казахской социалистической республике. В 1966 году после окончания обучения молодой специалист Михайлов В. М. по рекомендации декана электромашиностроительного факультета, профессора Виктора Тимофеевича Долбни был принят на работу инженером в Научно-исследовательскую лабораторию техники высоких напряжений и преобразователей тока, функционировавшую при институте. В 1968 году поступил в аспирантуру и под руководством лауреата государственной премии Украины, доцента, к. т. н. Саула Марковича Фертика в 1971 году защитил кандидатскую диссертацию.

Педагогическая деятельность Валерия Михайловича началась в 1970 году, когда по предложению



С. М. Фертика аспирант второго года обучения подготовил и начал читать свой первый курс лекций по дисциплине «Методы расчета и моделирования электромагнитных полей». Стоит особо отметить, что даже по прошествии более сорока лет этот курс хотя и видоизменялся, модернизировался, но остается одним из основных в инженерной подготовке студентов-электрофизиков. В 1971 году к.т.н. Михайлов В. М. был переведен на должность ассистента кафедры «Инженерная электрофизика». Преподавание совмещал с научными исследованиями и более 15 лет с обязанностями председателя студенческого научного общества ХПИ.

В 1978 году поступил в докторантуру. Докторская диссертация, посвященная поверхностному эффекту в проводниках при получении сильных импульсных магнитных полей, была защищена в 1981 году в Ленинграде по специальности «Теоретические основы электротехники». В 1986 году ему присуждено ученое звание профессора. С 1996 по 2005 избирался заведующим кафедрой «Инженерная электрофизика», на которой в настоящее время продолжает работать в должности профессора. Валерий Михайлович подготовил три доктора и десять кандидатов технических наук. Разработал и читает курсы лекций по таким дисциплинам: «Теоретические основы электротехники»; «Математическая физика»; «Специальные вопросы математики»; «Современный математический аппарат для инженеров» и др. Дальновидность и организаторские способности профессора Михайлова В.М. способствовали открытию в 1999 г. новой для кафедры специальности «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии».

Юбилиар является известным в Украине и за рубежом ученым в области моделирования импульсных электромагнитных полей и процессов в электрофизических установках, автором более 140 научных и методических трудов, 12 изобретений (в том числе 5 иностранных патентов), монографии и двух учебных пособий с грифом МОН Украины. Член двух специализированных советов по защите кандидатских и докторских диссертаций, в одном из которых является заместителем председателя совета. Член ученого совета физико-технического факультета. Научный руководитель и главный научный сотрудник Лаборатории магнитно-импульсной обработки материалов. Многогранность Валерия Михайловича, сформированная на протяжении всего жизненного пути, позволяет охарактеризовать его как чуткого, внимательного, творческого человека, ценителя красоты естественной природы.

Редакция журнала «Электротехника и Электромеханика», деканат физико-технического факультета, сотрудники и студенты кафедры «Инженерная электрофизика», ученики, друзья и коллеги Валерия Михайловича желают доброго здоровья, долголетия, дальнейших успехов в научной и педагогической работе, счастья ему и всем родным и близким.

КЛИМЕНКО БОРИС ВОЛОДИМИРОВИЧ

(До 70-річчя з дня народження)

Борис Володимирович народився 14 лютого 1943 року у місті Кемерово. У 1964 році з відзнакою закінчив Харківський політехнічний інститут за спеціальністю «Електричні машини і апарати» і отримав кваліфікацію інженера-електромеханіка. Працював на посадах інженера, старшого інженера науково-дослідного відділу у Харківському політехнічному інституті (ХПІ). У 1968 році він вступив до аспірантури і в 1971 році захистив кандидатську дисертацію на тему «Дослідження температурних і магнітних полів в електромагнітах». Після захисту дисертації працює на викладацькій роботі асистентом (1971), доцентом (1973), у період з 1995 по 2004 рік та з 2012 року знов працює на посаді завідувача кафедри «Електричні апарати». У 1994 році захистив докторську дисертацію на тему «Форсовані електромагнітні системи електричних апаратів». У 2000 році йому було присуджено вчене звання професора.

Борис Володимирович набув великого авторитету вченого у вищих навчальних закладах, підприємствах і фірмах України, країн СНД і далекого зарубіжжя. Основні напрями його наукових досліджень – теплові та магнітні поля, форсовані електромагнітні системи, бістабільні актуатори для вакуумних відмикачів середніх напруг, міжнародна електротехнічна термінологія, питання електробезпеки. Він є автором трьох монографій, 180 друкованих праць і 60 авторських свідоцтв і патентів. Як головний спеціаліст він приймав участь у розробці вітчизняних електромагнітних контакторів постійного струму у межах Державної науково-технічної програми «Електротехніка». Був керівником ряду науково-дослідних госпрозрахункових робіт. Результати досліджень впроваджені у промислове виробництво з великим науково-технічним ефектом на підприємствах України і країн СНД. Його монографія «Форсовані електромагнітні системи», яка була видана у видавництві «Енергоатоміздат» (м. Москва) у 1990 році, широко відома серед спеціалістів у галузі електричних апаратів. Під його керівництвом підготовлено шість кандидатських і одна докторська дисертації. Майже 40 років він працює членом спеціалізованої Вченої ради по захисту кандидатських та докторських дисертацій.

Багато уваги і сил приділяв він організаційно-методичній роботі, питанням змісту вищої освіти. Він був членом науково-методичної комісії Міністерства освіти і науки України з електромеханіки, членом робочої групи з розробки стандартів освіти, очолював комісію Методичної ради університету з питань змісту освіти. За його ініціативою на кафедрі було розпочато підготовку спеціалістів за спеціальністю «Електропобутова техніка».

Будучи лектором від природи, він викладає базові дисципліни спеціальності «Електричні машини та апарати», розробив оригінальні курси «Електромеханічні апарати низької напруги», а також «Електромеханічні апарати високої напруги та комплектні при-

строї». Багато уваги приділяє удосконаленню лабораторної бази кафедри. Його великі термінологічні посібники, видані у 2008 та 2009 роках з грифом Міністерства освіти, науки, молоді та спорту України, широко відомі за межами НТУ «ХПІ», а його навчальний посібник «Електричні апарати. Загальний курс», виданий у 2012 році також з грифом Міністерства накладом 1000 примірників увійшов до бібліотечного фонду усіх вищих навчальних закладів України, де ведеться підготовка за напрямами «Електротехніка» та «Електромеханіка», близько 30 ВНЗ України, а також десятки промислових підприємств та комерційних установ замовили та придбали ці посібники. На пропозицію колег з Російської Федерації автор зараз працює над перекладом цього посібника на російську мову для видання його в Росії як підручника для студентів, що навчаються за напрямами підготовки «Електротехніка», «Електромеханіка» та «Електротехнології».

Борис Володимирович прикладав багато зусиль до розширення зв'язків кафедри «Електричні апарати» з провідними вищими навчальними закладами України і Росії. Завдяки його цілеспрямованості і наполегливості на кафедрі «Електричні апарати», був створений експозиційний центр площею 150 м², суттєво модернізовано та розширено обчислювальний центр.

У 1998 році за його ініціативою були встановлені контакти з рядом фірм Польщі і розпочав регулярну роботу міжнародний симпозіум SIEMA з проблем уdosконалення електричних машин і апаратів. З 2001 року цей симпозіум набуває статусу наукових зборів, які притягають на щорічні зустрічі в університеті провідних вчених, спеціалістів-електротехніків і викладачів України, Росії, Польщі, Азербайджану, Латвії, Германії і США, які зв'язали своє життя з електротехнікою. Завдяки його організаторському почину у 2002 році вийшов перший номер науково-практичного журналу «Електротехніка і електромеханіка», в якому він є головним редактором. Журнал увійшов до переліку фахових видань ВАК і набув визнання не тільки в Україні, але й у інших країнах СНД.

Професор Б.В. Клименко бере активну участь у національних й міжнародних наукових, технічних та методичних конференціях і семінарах з питань електротехніки, педагогічної майстерності та змісту освіти.

Серед колег Борис Володимирович користується заслуженою повагою і авторитетом за доброзичливість, тактовність, скромність, вміння знайти потрібні слова і виконати будь-яку роботу.

Ректорат НТУ «ХПІ», деканат електромашинобудівного факультету, співробітники кафедри «Електричні апарати», друзі і колеги вітають Бориса Володимировича з ювілеєм і бажають міцного здоров'я, великого щастя, доброго настрою, невичерпної енергії, творчих успіхів та здійснення усіх його сподівань.

Редакційна колегія журналу «Електротехніка і електромеханіка» приєднується до цих побажань.

