

## НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА" ДЕРЖВИДАННЯ

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України КВ № 6 Видання засновано Національним технічни "Харківський політехнічний інститут"

### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Клименко Б.В.	головний редактор,	M
Баранов M I	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків д.т.н., НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків	Мих
Εατωτία ΙΟ Β		Нам
Eino Ocran		
ыро оскар	професор, технічний університет,	Попо
		подо
DOEB D.M.		_
БОЛЮХ В.Ф.	д.т.н., професор, нту "ХГП", Харків	P
Буткевич О.Ф.	д.т.н., професор, гол.н.с. ІЕД НАНУ, Киів	_
Віницький Ю.Д.	д.т.н., професор, GERUS	P
	Москва, Росія	
Гурин А.Г.	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків	Po
Данько В.Г.	голова редакційної ради,	
	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків	I
Долежел Іво	професор, Західно-чеський університет,	
	Пльзень, Чеська Республіка	P۱
Жемеров Г.Г.	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків	
Загірняк М.В.	д.т.н., професор, член-кор, НАПНУ.	
••••••	ректор КрНУ Кременчук	(
Кириленко О В		•
Knapuouko B I		Шициз
кравченко в.і.		Шипка
	молния тту ліп, ларків	
EDITORIAL	BOARD:	
Klymonko B V	Editor in Chief professor National	
Riymenko D.v.	Technical University "Kharkiy Delytechnic	
		Б
DeveneryMI	Institute (NTU KNPT), Knarkiv, Ukraine	R
Baranov M.I.	Dr.Sc. (Eng.), NTU "KnPI", Kharkiv, Ukraine	
Batygin Yu.V.	Professor, Kharkiv National Automobile	_
	and Highway University, Kharkiv, Ukraine	Roz
Bíró O.	Professor, Institute for Fundamentals and	
	Theory in Electrical Engineering, Graz, Austria	R
Boev V.M.	Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	
Bolyukh V.F.	Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	
Butkevich O.F.	Professor, Institute of Electrodynamics	
	of NAS Ukraine, Kyiv	Ru
Dan'ko V.G.	Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	
Doležel I.	Professor. University of West Bohemia.	
	Pilsen, Czech Republic	
Gurin A.G.	Professor, NTU "KhPI" Kharkiv Ukraine	S
Kirilenko O V	Professor Institute of Electrodynamics of NAS	•
	I kraine academician of NAS of Ukraine Kviv	Shink
Kravchenko VI	Professor NTLL "KhPI" Kharkiv Likraino	
Maeliov V C	Drofossor, NTU "KhDI" Kharkiv, Ukraine	т
Mibaylov V.M.	Professor NTU "Khol" Kharkiy Ukraina	1
Milykh V I	Professor, NTU KIPI, Klidikiv, Ukraine	\ <i>\</i> :
willykn V.I.	Professor, NTU KIPI, KNARKIV, UKRAINE	VI
Namitokov K.K.	Protessor, O.IVI. Beketov Kharkiv National	Ŷ
<b>.</b>	University of Municipal Economy, Ukraine	_
Omeľyanenko V.I.	Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	Zagi
Podoltsev O.D.	Professor, Institute of Electrodynamics	
	of NAS Ukraine, Kyiv	
Puilo G.V.	Professor Odessa National Polytechnic	Zher

University, Ukraine

2 6115 від 30.	04.2002 p.	Contractions (1792) and units for the last for the state and the form of the state
ним універси	тетом	Second second second second programs "Springer
лт" v 2002 р.		
		And the second data of part
	1	
Маслієв В.Г.	д.т.н., професор, НТУ "У	(ПІ", Харків
Іихайлов В.М.	д.т.н., професор, НТУ "У	(ПІ", Харків
Мілих В.І.	д.т.н., професор, НТУ ">	(ПІ", Харків
амітоков К.К.	д.т.н., професор, ХНУМ	Г, Харків
ельяненко В.І.	д.т.н., професор, НТУ ">	(ПІ", Харків
дольцев О.Д.	д.т.н., професор, гол.н.с	. ІЕД НАНУ, Київ
Пуйло Г.В.	д.т.н., професор, ОНТУ,	Одеса
Райнін В.Ю.	д.т.н., професор, Моско	вський
	енергетичний інститут, І	Иосква, Росія
Рєзцов В.Ф.	д.т.н., професор, член-к	ор. НАНУ,
	заст. директора IBE HAI	НУ, Київ
Розанов Ю.К.	д.т.н., професор, Моско	вський
	енергетичний інститут, І	Иосква, Росія
Розов В.Ю.	д.т.н., професор, член-к	ор. НАНУ,
	директор ДУ "ІТПМ НАН	I України", Харків
Рудаков В.В.	д.т.н., професор, НТУ ">	(ПІ", Харків
Сокол Є.І.	д.т.н., професор, член-к	ор. НАНУ,
	проректор НТУ "ХПІ", Ха	арків
Сосков А.Г.	д.т.н., професор, ХНУМ	Г, Харків
Ткачук В.I.	д.т.н., професор, НУ "Ль	вівська
	політехніка", Львів	
нкаренко В.Ф.	д.т.н., професор, НТУУ	"КПІ", Київ
Юферов В.Б.	д.т.н., професор, ННЦ Х	ФТІ, Харків
Rainin V.E.	Professor, Moscow Powel	Engineering
	Institute, Moscow, Russia	C 1
Rezisov V.F.	Professor, vice-director of	
	for Renewable Energy of I	NAS of Ukraine,
	Corresponding member of	NAS UKIAINE, Kylv
tozanov ru.c.	Professor, Moscow Powel	Engineering
Denov V/ Vu	Institute, Moscow, Russia	
R020V V.TU.	Professor, corresponding	
	of Tashning Drahlama of Ma	Institution Institute
	of Ekraino Kharkiv Ekrai	
	Professor NTU "KhDI" KI	harkiv Likraino
Sokol Vol	Professor corresponding	momber of NAS of
50k01 16.1.	Likraina Vice rector of NT	IIIember of NAS of
	Ukraino	U MIFT, MIAINV,
Soskov A G	Professor OM Beketov K	harkiv National
003K0V A.O.	University of Municipal Eco	nomy Elkraine
nkarenko V F	Professor National Techn	nical University of
	Likraine "Kviv Polytechnic	Institute"   Ikraine
Tkachuk V I	Professor I viv Polytechni	notional
	University Ukraine	
Vinitzki Yu.D	Professor GERUS Moso	ow Russia
Yuferov V.B.	Professor, Kharkiv Nation	al Science Center
	Institute of Physics and Te	echnology, Ukraine

agirnyak M.V. Professor, corresponding member of NAPS Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskii National University, Kremenchuk, Ukraine Zhemerov G.G. Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

Відповідальний секретар / Executive secretary: Гречко О.М. / Grechko О.М., тел. +38 067 3594696, e-mail: a.m.grechko@mail.ru

Адреса редакції / Editorial office address: Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна Dept. of Electrical Apparatuses, NTU "KhPI", Frunze Str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine тел. / phone: +38 057 7076281, e-mail: a.m.grechko@mail.ru ISSN (print) 2074-272X, ISSN (online) 2309-3404

© Національний технічний університет "ХПІ", 2014

Підписано до друку 08.10.2014 р. Формат 60 х 90 1/8. Офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25. Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-05-2014. Ціна договірна.

Дизайн та оформлення обкладинки ФОП Тимченко А.М. 61124, Україна, м. Харків-124, а/с 2249

Надруковано ТОВ "Друкарня "Мадрид"", м. Харків, вул. Ольмінського, 11





## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS

Науково-практичний журнал Научно-практический журнал Scientific and practical journal

2014/5



Рекомендовано до видання Вченою радою Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Протокол № 8 від 26 вересня 2014 р.

# ЗМІСТ

## Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 22: Изобретение аккумуляторов электрической энергии	3
Електричні машини та апарати	
<b>Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С.</b> Экспериментальные исследования влияния параметров ферромагнитного сердечника на электромеханические показатели линейного индукционно-динамического преобразователя	13
<b>Бондар Р.П.</b> Енергетичні характеристики вібратора з приводом від лінійного двигуна з неявнополюсним якорем	19
Костюков И.А. Исследование вносимых индуктивностей и активных сопротивлений при сканировании спиральной ферромагнитной проволоки полем параметрического вихретокового преобразователя Лавриненко О.В. Исследование переходных процессов и выбор оптимальных параметров коммутирующих элементов для устройства управления электромагнитным клапаном отбора проб	25
выпускных газов двигателя внутреннего сгорания	30
Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей	37
Силова електроніка	
Жемеров Г.Г., Лобач И.О. Уменьшение потерь энергии в коммунальных Smart Grid сетях за счет перехода от однофазных к трехфазным системам электроснабжения	ι <b>45</b>
Теоретична електротехніка	
Боев В.М. Электромагнитное поле кабеля с двухслойным экраном Кутковецький В.Я. Явище миттєвої передачі потенційної енергії між електричними контурами та системами	50 53
Техніка сильних електричних та магнітних полів	
Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Экспериментальные исследования процессов в индукторной системе с притягивающим экраном при введении дополнительного витка Беспрозванных А.В., Бойко А.Н. Контактная разность потенциалов – как показатель степени старения полимерной изоляции силовых кабелей Беспрозванных А.В., Кессаев А.Г. Вычислительные эксперименты для расчета напряженности осесимметричного электростатического поля в кусочно-однородной изоляции со сферическими включениями	58 62 67
Інформація	
Вимоги щодо оформлення англомовного списку літератури у журналі "Електротехніка і електромеханіка"	73
TABLE OF CONTENTS	
Electrical Engineering, Events, Famous Names	
<b>Baranov M.I.</b> An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 22: Invention of electric energy accumulators	3
Electrical machines and apparatus	
<b>Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S.</b> Experimental study of ferromagnetic core parameters influence on electromechanical characteristics of a linear induction-dynamic converter	13 19 25

Lavrinenko O.V. Research on transients and choice of optimum parameters of switching elements

Stavinskii A.A., Palchykov O.O. Application of a relative technical level index method to induction motor optimization problems	37
Power Electronics	
<b>Zhemerov G.G., Lobach I.O.</b> Energy loss reduction in Smart Grid utilities for account of transition from single-phase to three-phase power distribution systems	45
Theoretical Electrical Engineering	
<b>Boev V.M.</b> Electromagnetic field of a cable with a two-layer shield	50 53
High Electric and Magnetic Field Engineering	
Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Experimental study of processes in an attractive-screen inductor system under additional coil insertion	58
<b>Bezprozvannych A.V., Boyko A.N.</b> Contact potential difference as a measure of power cable polymer insulation aging <b>Bezprozvannych A.V., Kyessaeyv A.G.</b> Computing experiments for calculation of electrostatic axisymmetric field in piecewise homeogeneous insulation with enhanced inclusions.	62 67
	07
	= 2
English-language citation requirements in "Electrical Engineering & Electromechanics"	13

## 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 2014 рік — 173,10 грн., на два місяці — 28,85 грн., на чотири місяці — 57,70 грн., на шість місяців — 86,55 грн., на вісім місяців — 115,40 грн., на десять місяців — 144,25 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 перереєстровано 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 (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВИНИТИ.

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", зареєстрованому у Міжнародній системі реєстрації періодичних видань під стандартизованим кодом ISSN 2074-272Х, надсилається до Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського і, починаючи з 2005 р., представлена на сайті бібліотеки (nbuv.mon.gov.ua) в розділі "Наукова періодика України", а також на офіційному сайті журналу (eie.khpi.edu.ua).

Журнал "Електротехніка і Електромеханіка" включений у довідник періодичних видань Ulrich's Periodical Directory (ulrichsweb.serialssolutions.com), у всесвітній федеративний бібліотечний каталог OCLC WorldCat за  $N^{0}$  851561709 (worldcat.org), індексується у наукометричних базах Index Copernicus (indexcopernicus.com), Российский Индекс Научного Цитирования – РИНЦ (elibrary.ru), Google Scholar (scholar.google.com) та входить до баз даних DOAJ (www.doaj.org), BASE (basesearch.net), Scientific Indexing Services (sindexs.org), CiteFactor (citefactor.org), DRIVER (www.driverrepository.eu), CyberLeninka (cyberleninka.ru), UIF (uifactor.org), OAJI (oaji.net), DRJI (drji.org), PBN (pbn.nauka.gov.pl), Research Bible (journalseeker.researchbib.com).



Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів статей відповідно до Вимог, які наведені на офіційному сайті журналу (eie.khpi.edu.ua), розміщеному на платформі "Наукова періодика України" (journals.uran.ua). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу. УДК 621.3:537.311:910.4

М.И. Баранов

## АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 22: ИЗОБРЕТЕНИЕ АККУМУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Наведено короткий нарис з всесвітньої історії винаходу людством основних видів акумуляторів, що накопичують і віддають споживачеві електричну енергію.

Приведен краткий очерк из всемирной истории изобретения человечеством основных видов аккумуляторов, накапливающих и отдающих потребителю электрическую энергию.

### ВВЕДЕНИЕ

Считается, что одним из наиболее значимых (по своим последствиям для нынешней земной цивилизации) и оригинальных открытий на Земле за последние 400 лет было открытие электричества [1]. В тоже время для практического использования "электричество" (согласно [2] под этим понятием понимается "совокупность явлений, обусловленных существованием, взаимодействием и движением электрических зарядов") появилось в распоряжении людей, начиная лишь с середины XIX века [3]. Так, например, на мировой торгово-промышленной выставке в г. Париже (1900 год) одной из главных достопримечательностей был освещенный в ночное время с помощью электричества (обычных лампочек накаливания) мост через реку Сена [1]. История развития нашей цивилизации за последние столетия свидетельствует нам о том, что с первых же дней после открытия электричества человечество стало в сильной степени зависимым от этого великого научно-технического изобретения. В последующем практически ни одно крупное технологическое достижение в истории человечества не обходилось без электричества и его элементарных носителей - свободных электронов [4]. Экскурс в мировую историю науки и техники показывает, что для промышленного и бытового использования электричества вначале стали создаваться мощные электрогенераторы, вырабатывающие переменное электрическое напряжение и далее переменный электрический ток, передаваемый по воздушным (кабельным) линиям электропередачи к потребителям электричества. Затем (можно и сказать одновременно с электрогенераторами) появились электродвигатели, преобразующие электроэнергию в механическую энергию движущихся частей машин различного промышленного и бытового назначения. А как же быть потребителю электричества в тех случаях, когда у него нет возможности подсоединиться к действующей стационарной линии электропередачи? Ответ на данный вопрос в нашем случае (в случае отсутствия эффективных беспроводных линий электропередачи, подобных "тесловским" устройствам передачи на расстояние электрической энергии [5]) может быть лишь только один - в этом случае необходим собственный компактный источник электроэнергии. Весогабаритные характеристики такого компактного передвижного (переносимого) источника электроэнергии будут определяться техническими возможностями потребителя электричества (например, для крупногабаритной подводной лодки и пользователя малогабаритного персонального

компьютера они будут совершенно разными). Постараемся ниже проследить в области электричества в хронологическом порядке за процессом эволюции компактного передвижного (переносимого) источника электроэнергии, часто необходимого ее потребителю.

### 1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ ПЕРВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

История изобретения первых электрических "аккумуляторов" (этот термин происходит от латинского слова "accumulator" - "собиратель" [2] и обозначает в нашем случае "устройство, предназначенное для накопления электрической энергии с целью ее последующего использования") своими "корнями" уходит в в конец XVIII и начало XIX веков. Именно тогда (в 1800 году) выдающимся итальянским физиком и естествоиспытателем Алессандро Вольтой (1745-1827 гг.) был изобретен первый химический источник тока, вырабатывающий электричество за счет химического взаимодействия двух разных металлов, помещенных в соляной раствор [5, 6]. Работая в то время в университете г. Павия, он заинтересовался "животным электричеством", открытым несколькими годами ранее его соотечественником, знаменитым итальянским физиологом Луиджи Гальвани (1737-1798 гг.), в честь которого электрохимические элементы питания позже по предложению А. Вольты были названы гальваническими [5]. На основании своих опытов А. Вольта опроверг предположение Л. Гальвани о том, что электричество вырабатывается в мышцах подопытной лягушки. Он неопровержимо доказал, что именно электрический ток, вырабатываемый при контакте двух различных металлов, разделенных "электролитом" (данный термин происходит от сочетания слов "электро", соответствующего слову "электрический", и "lytos" - "разлагаемый" и означает "химическое вешество (жидкий проводник), в котором перенос электричества осуществляется движением ионов" [2]), вызывает наблюдавшееся естествоиспытателями сокращение мышц в лягушачьих лапках [5, 6]. В том же 1800 году А. Вольта усовершенствовал созданный им химический источник тока и изобрел свой знаменитый "Вольтов столб" (рис. 1), ставший первым в мире источником постоянного тока. Представлял он собой вертикальную конструкцию из несколькмх десятков пар последовательно сложенных друг на друга кружков, изготовленных из двух различных металлов (меди и цинка) и проложенных между собой кружками суконной ткани или кожи, предварительно смо-

© М.И. Баранов

ченными в соляном растворе [3, 6]. Этот химический источник постоянного тока открыл для ученых весьма широкие возможности при изучении основных физических свойств электрического тока, в том числе и его электролитического действия [6]. Последующие работы по изучению и применению "столба" А. Вольты привели к созданию электрического аккумулятора, способного без больших потерь накапливать и затем отдавать электрическую энергию. Поэтому "Вольтов столб" по справедливости должен считаться родоначальником не только гальванических элементов, но и, видимо, аккумуляторов. Считается, что именно с изобретения "Вольтова столба" начинается новая эпоха в нашей цивилизации – эпоха электричества [1, 3].



Рис. 1. Схематическое изображение "Вольтова столба" в научно-технической литературе XIX века, ставшего по праву родоначальником электрического аккумулятора [1, 6]

В 1836 году английский ученый-химик Джон Даниель (1790-1845 гг.) путем коаксиального размещения медных и цинковых полых электродов в серной кислоте создал гальванический элемент Даниеля на напряжение в единицы вольт (напомним, что в знак признания научных заслуг итальянского ученого А. Вольты авторитетными представителями международной общественности его именем была названа единица электрического напряжения - Вольт), последовательнопараллельное соединение которых позволило изготовить первые электрические батареи для проведения различных научных исследований [3, 6]. Эти батареи Дж.Даниеля производили более стабильный электрический ток, чем электрохимическое устройство А. Вольты, приведенное на рис. 1. Однако, все эти элементы (батареи) были составлены из первичных ячеек, содержащих в качестве анода (положительно заряженного электрода) и катода (отрицательно заряженного электрода) те или иные металлы, разделенные между собой тем или иным электролитом. Например, А. Вольта в своем "Вольтовом столбе" в качестве отрицательного электрода использовал цинк, свинец, олово или железо, а в качестве положительного электрода медь, серебро, золото или графит [1]. А это означало, что они не могли перезаряжаться. Поэтому описанные выше химические источники энергии получили название гальванических элементов (иначе "батареек"), а сам электрофизический эффект выработки электроэнергии за счет химических реакций - гальванизмом [1, 6]. Известный английский ученый-химик Хэмфри Дэви (1778-1829 гг.) после открытия в 1800 году гальванического электричества стал проверять химические эффекты от прямого действия этого электричества на разные вещества [1, 3]. Вскоре он обнаружил, что при прохождении постоянного электрического тока через некоторые химические вещества, размещенные между металлическими анодом и катодом, они (эти вещества – электролиты) разлагаются. Этот электрохимический процесс позже был назван электролизом [2, 7]. Генерируемое напряжение в двухэлектродной системе "анод-катод" при этом было прямо пропорционально химической активности электролита с металлическими электродами. Со всей очевидностью химик Х. Дэви понял тогда, что химическое воздействие электролиза и первичной "ячейки Вольта" почти одинаковы [1, 6].

В 1854 году немецкий военный врач Вильгельм Зинстеден в своих поисковых экспериментах наблюдал следующий электрохимический эффект [8]: при пропускании им электрического тока от гальванического элемента через свинцовые листы-электроды, погруженные в разведенную серную кислоту, положительный электрод (анод) покрывался налетом двуокиси свинца PbO2, в то время как отрицательный электрод (катод) не подвергался никаким изменениям. Если потом эту свинцовую электродную систему замыкали накоротко, прекратив перед этим пропускание через него постоянного тока от внешнего электроисточника, то в его цепи появлялся постоянный электрический ток, который существовал до тех пор, пока вся двуокись свинца на свинцовом аноде не растворялась в примененной кислоте. Таким образом, взирая с современных завоеванных в течение столетий тяжелым трудом многочисленных ученых и изобретателей вершин научно-технического прогресса на указанные электрохимические опыты В. Зинстедена, можно заключить, что в своих исследованиях он вплотную приблизился к созданию электрического свинцового аккумулятора. Однако, согласно [8] этот любитель-исследователь не сделал никаких практических выводов из опытных данных своих наблюдений.

В 1859 году, работая в качестве ассистента в электротехнической лаборатории Александра Беккереля, французский инженер Гастон Планте (1834-1889 гг.) решил заняться усовершенствованием вторичных элементов электропитания для того, чтобы сделать их надёжными источниками электрического тока для телеграфии и проведения ряда экспериментов по изучению природы электричества. Кстати, согласно [9] Г. Планте (рис. 2) занимался исследованием атмосферного электричества, линейных и шаровых молний, которые он пытался воспроизвести во второй половине XIX века в лабораторных условиях. Правда, в [9] не указывается с помощью какого высоковольтного оборудования он стремился осуществить свои творческие планы в области атмосферного электричества.



Рис. 2. Изобретатель первого в мире свинцового аккумулятора, известный французский инженер Гастон Планте [1, 6]

Независимо от опытов В. Зинстедена в 1859 году Г. Планте свои исследования по перспективным источникам электропитания начал с электродной системы, состоящей из двух одинаковых свинцовых пластин, навитых на деревянный цилиндр. Друг от друга свернутые в рулон свинцовые электроды отделялись тканевой прокладкой. Устроенный таким путем электроприбор он помещал в стеклянный сосуд с подкисленной водой и подсоединял его к внешней электрической батарее (гальваническому элементу) [8]. Спустя несколько часов после работы его свинцовой электродной системы и отключения внешней батареи, Г. Планте убедился в том, что с нее можно было снимать достаточно сильный ток, который сохранял в течение некоторого времени свое постоянное значение. Так Г. Планте сделал то же самое открытие, что и его немецкий коллега В. Зинстеден, и построил первый в истории электрический свинцовый аккумулятор (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид первого круглого свинцового аккумулятора французского изобретателя Г. Планте (1859 год) [10]

Принято считать, что этими электрохимическими работами Г. Планте фактически и было положено начало аккумуляторной техники. Существенным недостатком такого свинцового аккумулятора Г. Планте была его небольшая рабочая емкость – он слишком быстро разряжался на нагрузочное сопротивление. Вскоре Г. Планте заметил, что емкость его аккумулятора можно увеличить специальной подготовкой поверхности свинцовых пластин, которые должны быть по возможности более пористыми. Чтобы добиться этого технического эффекта, Г. Планте разряжал заряженный аккумулятор, а затем опять пропускал через него постоянный электрический ток, но в противоположном направлении [8]. Этот процесс формовки свинцовых пластин повторялся им многократно в течение приблизительно 500 часов и имел целью увеличить на обеих свинцовых пластинах слой окиси свинца. В 1860 году Г. Планте подарил Французской академии наук первую свинцовую аккумуляторную батарею с серной кислотой в качестве электролита (рис. 4), собранную из отдельных параллельно подключенных круглых аккумуляторов в стеклянном корпусе, и получил за это звание профессора этой академии [10].



Рис. 4. Первая свинцовая аккумуляторная батарея Г. Планте, собранная из ряда отдельных круглых аккумуляторов и подаренная им Французской академии наук (1860 год) [6, 10]

Требуется отметить, что эта аккумуляторная батарея была исключительной для того времени по величине тока разряда. В этом отношении она превосходила все существовавшие тогда батареи источников тока, включая и гальванические элементы (батареи). Вскоре Г. Планте разработал первый свинцовый аккумулятор, использующий плоские свинцовые электроды, погруженные в серную кислоту (рис. 5) [10].



Рис. 5. Первый свинцово-кислотный аккумулятор французского изобретателя Г. Планте с плоскими рабочими электродами, размещенными в серной кислоте (1860 год) [6, 10]

В дальнейшем Г. Планте перестал заниматься усовершенствованием своих свинцовых аккумуляторов. Этим занялись другие изобретатели мира. Кстати, свинцово-кислотный аккумулятор Г. Планте с плоскими рабочими электродами (см. рис. 5) применялся в XIX столетии для освещения вагонов железнодорожных поездов во время их стоянки [6, 10]. В 1882 году Камилл Фор значительно усовершенствовал технику изготовления уже предложенных им в 1880 году решетчатых свинцовых пластин этого вида аккумулятора. Для этого К. Фор предложил покрывать каждую решетчатую свинцовую пластину суриком или другим окислом свинца. При зарядке аккумулятора в присутствии серной кислоты слой этого вещества на одной из пластин превращался в перекись свинца, тогда как на другой пластине вследствие химической реакции получалась низкая степень окисла свинца. Во время этих процессов на обеих решетчатых пластинах двухэлектродной системы аккумулятора образовывался слой окислов свинца с пористым строением, что способствовало скоплению выделяющихся из электролита газов на ее электролах [10]. Поэтому в свинцово-кислотном аккумуляторе К. Фора формирование решетчатых свинцовых пластин необходимой пористости происходило гораздо быстрее, что безусловно способствовало повышению их эффективности при работе в цепях потребителя электроэнергии. Отметим, что в мире крупносерийное производство свинцовокислотных аккумуляторов началось в 1890 году, а первый автомобиль с бензиновым двигателем и со свинцово-кислотным аккумулятором съехал с конвейера уже в 1900 году [11]. Несмотря на то, что с момента изобретения первого свинцово-кислотного аккумулятора прошло уже более 150 лет, в настоящее время по тем же принципам по-прежнему производится этот вид аккумуляторов для автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями, подводных лодок, ряда типов электротранспорта и источников бесперебойного питания некоторого электрооборудования. Заметим, что внутреннее устройство современного свинцово-кислотного аккумулятора выглядит следующим образом [11]: анод состоит из свинца или его сплавов, катод - из оксида свинца, а электролитом является раствор серной кислоты. Свинцовокислотный аккумулятор среди всех видов электрических аккумуляторов характеризуется самой низкой энергетической плотностью, находящейся на уровне около 20 Вт/кг [11, 12]. Использование свинцовых аккумуляторов в портативной электронной технике весьма ограничено из-за их высоких весовых характеристик. Помимо избыточного веса свинца, аккумуляторы данного вида имеют еще один существенный недостаток - они содержат водный раствор серной кислоты. Опасность чрезмерного электролиза их воды, входящей в состав электролита, в режиме зарядки этих аккумуляторов с образованием взрывообразной смеси водорода и кислорода и вытечки наружу вредного электролита не решили даже их герметичные пластмассовые корпуса. Безопасность данных аккумуляторов была существенно повышена, когда их серную кислоту стали хранить в гелеобразном состоянии (в смеси с другими веществами, например, с кремниевой кислотой [11]). Кстати, такие свинцовокислотные аккумуляторы маркируются аббревиатурой SLA (Sealed Lead Acid). Тем не менее, свинцовокислотные аккумуляторы (при внутреннем сопротивлении каждого элемента порядка 0,1 мОм и его рабочем напряжении около 2 В [13]) и созданные на их основе мощные аккумуляторные батареи в импульсном режиме работы (например, при создании сильных магнитных полей с длительностью импульса более 0,1 сек) могут выдавать на электрической нагрузке большие токи (до амплитуд порядка 10 кА [13]) и обходятся они потребителю аккумуляторной техники относительно дешево. Кроме того, они достаточно неприхотливы в работе и редко выходят из строя [1, 6].

В 1899 году Вальдмар Юнгнер из Швеции изобрел щелочную никель-кадмиевую (NiCd) аккумуляторную батарею [1, 6], в которой никель использовался в качестве положительного электрода (анода) и кадмий - в качестве отрицательного электрода (катода). Однако потребовалось еще почти полвека, чтобы NiCd - аккумулятор стал достаточно дешевым, долговечным и емким по удельной электрической мошности (сейчас он способен выдавать до 60 Вт/кг) для своего массового потребления [10]. Заметим, что никель-кадмиевый аккумулятор, хорошо нам известный сегодня, стал доступен людям только после изобретения Ньюманом в 1947 году его полностью герметичного корпуса [1, 6]. В 1901 году выдающийся американский электротехник Томас Эдисон (1847-1931 гг.) изобрёл альтернативную конструкцию NiCd - аккумулятору, заменив в нем кадмиевые электроды на железные [1, 6]. После изобретения в 1932 году Шлехтом и Акерманом спрессованного анода, в аккумуляторной технике было внедрено много усовершенствований, что привело к более высокому току в нагрузке и повышенной долговечности указанных аккумуляторов. Первоначально из-за высокой, по сравнению с сухими или свинцово-кислотными аккумуляторами, стоимости практическое применение щелочных никель-кадмиевых (NiCd) и никель-железных (NiFe) аккумуляторов было ограниченным. Укажем здесь, что за свои весомые достижения в науке и технике Г. Планте был награжден золотой медалью имени выдающегося французского физика Андре-Мари Ампера (1775-1836 гг.) [6]. В 1989 году Болгарская академия наук учредила медаль имени Гастона Планте (рис. 6).



Рис. 6. Золотая медаль им. Г. Планте, учрежденная Болгарской академией наук (1989 год) и вручаемая один раз в три года за выдающиеся заслуги в области новых технологий производства свинцово-кислотных аккумуляторов [1, 6]

Медаль имени Г. Планте вручается на Международной конференции по свинцово-кислотным аккумуляторам, имеющим 150-летнюю историю. Это традиционный и престижный научный форум, на котором учёные и специалисты со всего мира обсуждают вопросы, касающиеся технологии производства и эксплуатации аккумуляторных батарей, а также перспективы их развития. В настоящее время этой медали были удостоены 12 учёных из разных стран мира.

### 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Химический источник тока является тем источником электродвижущей силы (ЭДС), в котором энергия протекающих химических реакций непосредственно превращается в электрическую энергию. Основу всех химических источников тока составляют два электрода, контактирующие с размещенным между ними жидким или гелеобразным электролитом. Это анод, содержащий окислитель, и катод, содержащий восстановитель. Именно между этими двумя электродами химического источника тока и устанавливается разность электрических потенциалов - ЭДС, соответствующая по величине свободной энергии окислительно-восстановительных реакций, протекающих на поверхностях его электродов в присутствии электролита. Действие любых химических источников тока основано на протекании при замкнутой внешней электрической цепи пространственно-разделённых процессов на обращенных к электролиту поверхностях металлических электродов, в том числе [12]: а) на катоде, где восстановитель окисляется и в результате этой реакции образуются свободные электроны, создающие разрядный электрический ток во внешней цепи; б) на аноде, где подошедшие (смещенные) к нему посредством внешней цепи свободные электроны участвуют в химической реакции восстановления окислителя. В современных химических источниках тока используются следующие материалы:

• в качестве восстановителя (на катоде) – свинец Рb, кадмий Cd, цинк Zn и другие металлы;

• в качестве окислителя (на аноде) – оксид свинца PbO<sub>2</sub>, гидрооксооксид никеля NiOOH, оксид марганца MnO<sub>2</sub>, оксид меди CuO<sub>2</sub>, и другие;

• в качестве электролита – растворы щелочей, кислот или солей.

Современные химические источники тока *по* возможности или невозможности их повторного использования классифицируются на [12]:

• *гальванические элементы* (первичные источники тока), которые из-за необратимости протекающих в них реакций невозможно перезарядить;

• электрические аккумуляторы (вторичные источники тока), являющиеся перезаряжаемыми гальваническими элементами, которые с помощью внешнего источника электрического тока (зарядного устройства) можно перезарядить;

• *топливные элементы* (электрохимические генераторы), являющиеся устройствами, подобными гальваническому элементу, но отличающимися от него тем, что химические вещества для электрохимической реакции подаются в них извне, а продукты этих реакций принудительно удаляются из них, что позволяет им функционировать непрерывно.

Современные химические источники тока *по типу используемого электролита* классифицируются на [12]:

• *кислотные* (например, свинцово-кислотный аккумулятор, свинцово-плавиковый элемент);

• *щелочные* (например, ртутно-цинковый элемент, ртутно-кадмиевый элемент, никель-цинковый аккумулятор, никель-кадмиевый аккумулятор);

• солевые (например, марганцево-магниевый элемент, цинк-хлорный аккумулятор).

Рассмотрим вкратце ниже некоторые виды химических источников тока. Начнем с *гальванического* элемента, названного в честь известного итальянского ученого-физиолога Л. Гальвани [5]. Принцип действия гальванического элемента основан на взаимодействии двух различных металлов через электролит, приводящем к возникновению в замкнутой внешней цепи постоянного электрического тока. В табл. 1 согласно [12] приведены технические характеристики основных современных гальванических элементов.

Таблица 1

Технические характеристики основных типов современных гальванических элементов [12]

1				
Тип элемента	Анол	Электро-	Ка-	Рабочее на-
	ттод	ЛИТ	тод	пряжение, В
Марганцево- цинковый	MnO <sub>2</sub>	КОН	Zn	1.56
Марганцево- оловянный	MnO <sub>2</sub>	КОН	Sn	1,65
Марганцево- магниевый	MnO <sub>2</sub>	MgBr <sub>2</sub>	Mg	2,00
Свинцово- цинковый	PbO <sub>2</sub>	$\mathrm{H}_2\mathrm{SO}_4$	Zn	2,55
Свинцово- кадмиевый	PbO <sub>2</sub>	$\mathrm{H}_2\mathrm{SO}_4$	Cd	2,42
Свинцово- хлорный	PbO <sub>2</sub>	HClO <sub>4</sub>	Pb	1,92
Ртутно- кадмиевый	HgO <sub>2</sub>	КОН	Cd	1,92
Ртутно-цинковый	HgO <sub>2</sub>	KOH	Zn	1,36
Ртутно- оловянный	HgO <sub>2</sub>	КОН	Sn	1,30
Хром-цинковый	$K_2Cr_2O_7$	$\mathrm{H}_2\mathrm{SO}_4$	Zn	1,90

Для читателя будет небезынтересно узнать, что еще в 1865 году французский химик Ж. Лекланше предложил новый гальванический элемент ("элемент Лекланше"), состоявший из цинкового стаканчика, заполненного водным раствором хлористого аммония или другой хлористой соли, в который был аксиально помещён агломерат из оксида марганца MnO<sub>2</sub> с круглым угольным токоотводом [12]. Модификация этой известной конструкции гальванического элемента широко используется до сих пор в солевых батарейках для различных бытовых электроустройств. Кроме того, в 1890 году в г. Нью-Йорке (США) иммигрант из России Конрад Губерт создал первый карманный электрический фонарь, использующий элементыбатарейки Ж. Лекланше [12]. В 1896 году американская компания "National Carbon" приступила к массовому производству первых в мире сухих гальванических элементов под названием "Columbia" (разработчик этих элементов – Ж. Лекланше) [6]. Самым долгоживущим на сегодня в целом мире гальваническим элементом является серно-цинковая батарея, изготовленная в г. Лондоне (Англия) еще в 1840 году [6, 12]. Заметим, что подключенный к ней в то далекое время электрический звонок работает и по сей день в Кларендонской лаборатории г. Оксфорда (Англия) [1, 6].

Далее остановимся на электрических аккумуляторах, являющихся химическим источником постоянного тока многоразового действия. В отличие от гальванического элемента в электрическом аккумуляторе химические реакции, энергия которых непосредственно превращаемые в электрическую энергию, многократно обратимы [12]. Электрические аккумуляторы используются для накопления энергии и затем автономного электропитания различных электротехнических устройств (например, современного электропогрузчика "STILL", приведенного на рис. 7). В настоящее время в электротехнике используются следующие типы электрических аккумуляторов [12, 14]:

• Железо-никелевый аккумулятор; железовоздушный аккумулятор;

• Лантан-фторидный аккумулятор;

• Литий-железо-сульфидный аккумулятор; литийионный аккумулятор; литий-полимерный аккумулятор; литий-фторный аккумулятор; литий-хлорный аккумулятор; литий-серный аккумулятор;

• Натрий-никель-хлоридный аккумулятор; натрий-серный аккумулятор;

• Никель-кадмиевый аккумулятор; никельметаллгидридный аккумулятор; никель-цинковый аккумулятор;

 Свинцово-кислотный аккумулятор; свинцововодородный аккумулятор; свинцово-оловянный аккумулятор;

• Серебряно-цинковый аккумулятор; серебряно-кадмиевый аккумулятор;

• Цинк-бромный аккумулятор; цинк-воздушный аккумулятор; цинк-хлорный аккумулятор.



Рис. 7. Внешний вид современного электропогрузчика "STILL", работающего от аккумуляторной батареи [15]

Теперь поверхностно рассмотрим *топливный* элемент, являющийся электрохимическим устройством, подобным гальваническому элементу, но отличающимся от него тем, что необходимые для его работы химические вещества подаются в него извне [12, 14]. А раз так, то он характеризуется непрерывным процессом выработки электроэнергии и соответственно поэтому он не ограничен в запасах этого вида энергии, определяемых подаваемыми в него химическими реактивами. В этом заключается его принципиальное отличие от гальванического элемента или электрического аккумулятора, в которых запасается лишь строго ограниченное протекающими в них электрохимическими процессами количество электрической энергии. В настоящее время в технике применяются следующие типы топливных элементов [12]:

- Прямой метанольный топливный элемент;
- Твердооксидный топливный элемент;
- Щелочной топливный элемент.

### 3. КРАТКИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ

Электрический аккумулятор является электрохимическим устройством, способным как поглощать (в режиме его заряда), так и отдавать (в режиме его разряда) во внешнюю цепь электрическую энергию в результате обратимых электрохимических реакций, происходящих внутри этого устройства в области его катода и анода, контактирующих с размещенным между ними электролитом. Аккумулятор (например, обычный автомобильный свинцово-кислотного типа) является не источником тока, а источником электрической энергии, а, точнее, источником напряжения. Поскольку только источник напряжения способен поддерживать заданную величину разности электрических потенциалов при изменении сопротивления внешней нагрузки. Несмотря на то, что с момента изобретения первого полноценного гальванического элемента (батарейки А. Вольты или "Вольтова столба", 1800 год [1, 6]) прошло уже свыше 210 лет, а с момента изобретения первого полноценного аккумулятора (свиниово-кислотного аккумулятора Г. Планте, 1860 год [1, 6]) - более 150 лет, основополагающие принципы их работы на сегодня остаются неизменными. Согласно [11] никаких принципиальных перестановок в электрофизическом механизме их функционирования в ближайшем времени не предвидится. Все электрические аккумуляторы, как и гальванические элементы (батарейки), состоят из трех основных элементов: двух электродов (анода и катода) и электролита, который находится между их электродами [6, 11]. Появление в их внешней цепи постоянного электрического тока является побочным продуктом возникающей в электрическом аккумуляторе электрохимической окислительно-восстановительной реакции, во время которой положительно заряженные ионы кислорода в зоне его электродов и электролита переходят от одних молекул химического вещества к другим [11]. Технические характеристики каждого конкретного аккумулятора, прежде всего, зависят от выбора материалов для его металлических электродов и электролита. Учитывая, что для этих целей можно использовать различные комбинации соединений материалов, то количество всевозможных типов аккумуляторов, как и гальванических элементов, практически не ограничено. Разумеется, немаловажную роль здесь играет и конструкция аккумулятора (гальванического элемента), но ее роль вторична по сравнению с выбором материалов их электродов и электролитов. Поэтому каждый тип электрического аккумулятора или гальванического элемента наделен собственными уникальными свойствами. Они, в частности, различаются [6, 11]: по плотности запасаемой и отдаваемой ими электрической энергии (по соотношению их емкости к весу); по номинальному выходному напряжению; по силе тока; по сроку годности; по температурными предпочтениям и многим другим параметрам.

### 4. СВОЙСТВА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ

• Чтобы завершить нами рассмотрение свинцовокислотных аккумуляторов приведем краткие данные о новых современных разработках этих достаточно распространенных в мире аккумуляторов. При этом отметим, что дальнейшая история развития соответствующих научно-технических решений и технологий производства свинцово-кислотных аккумуляторов представляла собой постепенное усовершенствование конструкции и технологии производства классических аккумуляторов с жидким или свободным электролитом. Как производители, так и потребители этих аккумуляторов в разных странах мира вполне закономерно мечтали об таком свинцовокислотном аккумуляторе, который не требовал бы регулярного обслуживания в части пополнения его дистиллированной водой и измерения в нем плотности электролита на основе серной кислоты. Всем хотелось, чтобы он был безопасен с точки зрения утечки с него паров серной кислоты и выделения водорода при заряде и того, чтобы он не требовал организации специальной вентиляции помещения, в котором эксплуатируются подобные аккумуляторы. И надо сказать, что целенаправленные усилия ученых и инженеров немецкой компании "Sonnenschein", основанной в г. Берлине в 1910 году учеником выдающегося физика-теоретика Макса Планка (1858-1947 гг.) [3] - Теодором Зонненшайном, привели к созданию первого в мире промышленного образца необслуживаемого герметизированного свинцово-кислотного аккумулятора с загущенным электролитом [9]. В 1958 году Т. Зонненшайном и его сотрудниками был получен патент на подобный аккумулятор системы "Dryfit" (рис. 8) и было начато его серийное производство [9].

• Никель-кадмиевые аккумуляторы (NiCd) долгое время были самыми востребованными аккумуляторами для портативных радиоэлектронных устройств [11]. В данных щелочных аккумуляторах электроды состоят из никеля (*aнod*) и кадмия (*каmod*), погруженных в едкий калий КОН. Нам требуется сразу заметить, что кадмий является сильнейшим ядом. Поэтому такие аккумуляторы не рекомендуется выбрасывать с общим мусором, а также вскрывать после окончания срока их эксплуатации и сжигать. Никелькадмиевые элементы могут "похвастаться" способностью порождать (создавать) достаточно большие постоянные токи в нагрузке. Причем, что весьма ценно, в отличие от аккумуляторов многих других типов, по мере разряда таких аккумуляторов их рабочее напряжение слабо изменяется по сравнению с его изначальным значением [11]. При своих удельных энергетических показателях до 60 Вт/кг они обладают и таким немаловажным достоинством как способностью выдерживать внушительное количество циклов перезарядки. Обычно их хватает на 500-1000 циклов перезарядки и более [8, 14]. В NiCd-аккумуляторах существует опасность электролиза воды в составе их электролита. Чтобы в них не скапливался взрывоопасный водород Н, эти батареи оснащают микроскопическими клапанами. Излишняя токсичность их кадмиевых электродов и далеко не идеальные показатели по емкости привели к тому, что никель-кадмиевые аккумуляторы в последнее время стали использоваться достаточно релко. Елинственное, что оставляет NiCdаккумуляторы пока еще "на плаву" - так это их сравнительно низкая стоимость для потребителя [11].



Рис. 8. Титульный лист патента ФРГ №1194013 на герметизированный свинцово-кислотный аккумулятор новой системы "Dryfit" (соавторы – Т. Зонненшайн и его коллеги) [9]

• Никель-металлгидридные аккумуляторы (NiMH) в последние годы пришли на смену никелькадмиевым аккумуляторам. Конструктивно они схожи с NiCd-аккумуляторами. Их аноды также изготавливаются из никеля Ni. Однако для катодов вместо кадмия Cd используются принципиально другие материалы - "гидриды" (этот термин происходит от латинского слова "гидрогениум" - "водород" и греческого слова "eidos" - "вид" и означает "химические соединения водорода с другими элементами из периодической системы Д.И. Менделеева" [2]) [6, 11]. По своей природе гидриды являются особыми металлическими сплавами, способными удерживать атомарный водород Н. Учитывая, что водород Н идеально подходит для участия в окислительно-восстановительных реакциях на электродах аккумулятора и что содержание водорода Н в гидридах составляет значительную долю от их общей массы, то гидриды справляются со своими задачами на порядок лучше кадмия Cd [11].

Тем более, NiMH-технология при производстве аккумуляторов менее токсична, чем NiCd-технология. Ее можно считать даже вполне экологически чистой [10]. Удельные энергетические показатели для никельметаллгидридных аккумуляторов (рис. 9) составляют до 80 Вт/кг, то есть в среднем при одной и той же массе NiMH-аккумуляторы обладают примерно на 35 % большей емкостью, чем NiCd-аккумуляторы [1, 15].



Рис. 9. Внешний вид современных малогабаритных ("пальчиковых") никель-металлгидридных (NiMH) электрических аккумуляторов, используемых в портативной технике [15]

Поэтому в настоящее время NiMH-батареи, даже, несмотря на свою повышенную стоимость, активнее, нежели NiCd-батареи используются в портативной электронике [11]. Однако, согласно данным из [6, 10] никель-металлгидридные аккумуляторы, по сравнению с NiCd-аккумуляторами, выдерживают меньшее количество циклов перезарядки - всего порядка 500. Другим серьезным недостатком для рассматриваемых нами NiMH-аккумуляторов оказался их повышенный саморазряд. Он оказался в полтора-два раза быстрее, чем даже для NiCd-аккумуляторов, у которых с этим показателем также было не все в порядке [11]. Правда, постепенно с развитием NiMHтехнологии данные недостатки для этого вида аккумуляторов удалось определенным образом выправить. Но к этому времени в исследовательских лабораториях заканчивались работы над перспективной альтернативой NiMH-аккумуляторам – литий-ионным аккумуляторам [11].

• Литий-ионные аккумуляторы (Li-Ion) в виде опытных образцов появились в 1970-х годах, а к 1980м годам Li-Ion-технология доросла уже и до серийного производства этого нового вида аккумуляторов [10, 11]. Выбор разработчиков нового поколения аккумуляторов пал на литий Li не случайно. Ведь он является наиболее химически-активным металлом. Именно поэтому литий Li великолепно справляется с ролью металлического катода во вторичных элементах электропитания [11]. Однако чрезмерная химическая активность лития Li может приводить и к неприятным последствиям, вплоть до моментального воспламенения такого аккумулятора. Поэтому ученым-химикам пришлось искать искусственные способы по обузданию такого химико-реакционного "пыла" лития Li, сохранив при этом его выдающиеся химические свойства. Вскоре выход из создавшейся нелегкой ситуации был все же найден. Оказалось, что литий Li в своем ионном состоянии химически менее опасен и при этом не менее химически продуктивен [6, 10]. Литийионный аккумулятор содержит угольный катод и анод, выполненный из диоксида лития и кобальта Со. Между катодом и анодом этого аккумулятора помещен электролит (например, соляной раствор лития Li) [11]. Отличительной особенностью описываемого нами Li-Ion-аккумулятора является то, что в нем ионы лития Li перемещены из приповерхностных областей катода в объем электролита. Несмотря на то, что рассматриваемые здесь литий-ионные батареи с учетом указанного выше научно-технического решения стали на порядок безопаснее, все же возможность воспламенения в них не была исключена полностью. Укажем, что Li-Ion- аккумуляторы наделены высокой рабочей емкостью и соответственно имеют высокие удельные энергетические показатели (до 110 Вт/кг) [11]. Они выдерживают огромное количество циклов перезарялки и хорошо держат накопленный электрический заряд (его потери при саморазряде составляют до 5 % в месяц) [8]. Главным недостатком литийионных аккумуляторов является то, что из-за "эффекта старения" они примерно через год после изготовления начинают постепенно портиться, даже если и не используются в работе. Кроме того, они теплолюбивы и имеют сравнительно высокую цену [11]. Только в настоящее время Li-Ion-аккумуляторы стали медленно вытесняться новыми разработками в области аккумуляторной техники. Тем не менее, большинство современных ноутбуков (рис. 10), сотовых телефонов и карманных компьютеров по-прежнему питаются от аккумуляторных батарей данного типа [11].



Рис. 10. Внешний вид современного ноутбука, в котором в качестве автономного малогабаритного источника электропитания используются литий-ионные аккумуляторы [15]

• Литий-полимерные аккумуляторы (Li-Polymer) или точнее литий-твердополимерные аккумуляторы представляют собой усовершенствованный вариант Li-Ion-технологии [6, 11]. В конструкционном исполнении Li-Polymer-аккумуляторов принципиально изменена лишь одна деталь – их жидкий электролит заменен на твердый материал. В качестве химической основы электролита в этих аккумуляторах по-прежнему используются соли лития Li. Только в данном случае они содержатся в специальной твердотельной полимерной прокладке, помещенной между анодом и катодом [11]. За счет отказа от жидкого электролита у Li-Polymer-батарей (рис. 11) появилось несколько дополнительных преимуществ.



Рис. 11. Плоский литий-полимерный (Li-Polymer) электрический аккумулятор, используемый в современных мобильных телефонах для их автономного электропитания [15]

Во-первых, так как эти аккумуляторы не нуждаются в металлической оболочке, то у них повысились удельные значения мощности (до 150 Вт/кг) [10]. Вовторых, теперь появилась возможность выпускать Li-Polymer-батареи в корпусах практически произвольной формы в отличие от Li-Ion-аккумуляторов, которые требуют либо цилиндрического, либо прямоугольного корпуса [11]. В-третьих, новые Li-Polymerаккумуляторы стали существенно безопаснее литийионных аккумуляторов и менее токсичны. При этом их стоимость мало отличается от цены Li-Ionаккумуляторных элементов электропитания различных портативных электронных и радиотехнических устройств и фотоаппаратуры. Считается, что у литийполимерных аккумуляторов в ближайшее время есть все шансы вырваться на первое место в мире по своей популярности и востребованности среди многообразных типов аккумуляторов. Единственное, что может встать у них на этом пути, так это возможный запуск в ближайшие годы в серийное производство серебряно-цинковых батарей, аккумуляторов на основе нанотрубок или топливных элементов [11].

• Серебряно-цинковые аккумуляторы были разработаны достаточно давно и на данный момент времени они уже активно используются в военной и ракетно-космической технике [11]. Кроме того, они часто применяются также в часах, калькуляторах и другой маломощной электронике. Устройство серебряноцинковых аккумуляторов выглядит следующим образом: катод состоит из цинка Zn, анод – из оксида серебра AgO<sub>2</sub>, а электролит – из гидрооксида калия КОН. Данный тип щелочных аккумуляторов характеризуется высокими удельными энергетическими (мощностными) показателями (до 240 Вт/кг), возможностью отдавать в электрическую нагрузку огромные токи и достаточно низким саморазрядом [11]. Однако, с долговечностью и с многократными циклами перезарядки у серебряно-цинковых аккумуляторов всегда были серьезные проблемы. Причиной скорого выхода этих аккумуляторов из строя было, в первую очередь, появление так называемых цинковых дендритов, приводящих впоследствии к короткому замыканию их электродов, а также все тот же электролиз воды, входящей в состав их электролита [11]. Именно по этим причинам до недавнего времени данные аккумуляторы были непригодны для использования в ноутбуках, мобильных телефонах и прочих электронных устройствах подобного типа. Последние разработки в области аккумуляторной техники заинтересованных компаний (например, Zinc Matrix Power) показали, что с серебряно-цинковыми батареями не все потеряно и вскоре они смогут составить конкуренцию литиевым электроэлементам [10, 11]. Сторонники технологии их производства особо отмечают то, что данные аккумуляторы безвредны для окружающей среды и абсолютно безопасны. Поэтому в свете последних неприятных событий вокруг литиевых батарей (имеется в виду самая крупномасштабная в истории электронной техники компания по отзыву в 2012 году проблемных (самовзрывающихся) литий-ионных батарей японской фирмы Sony, когда под обмен попало 9,6 миллионов штук ноутбуков известных марок Dell, Toshiba, Apple, Sony и других компьютерных фирм мира [11]), у серебряно-цинковых аккумуляторов появилось заметно больше шансов на возможный коммерческий успех.

### 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АККУМУЛЯТОРЫ БУДУЩЕГО

Согласно данным, приведенным в [1, 6, 10-12], литиевые аккумуляторы пока уверенно "правят балом" на рынке аккумуляторного сектора электротехнологий. У них действительно есть неплохой коммерческий потенциал, благодаря последним разработкам в области литий-полимерных аккумуляторов. Со времени создания литий-полимерных аккумуляторных батарей в мировом коммерческом обороте не появилось никаких принципиально новых систем для портативных источников электропитания. Отметим, что с 2002 года в мировых научных центрах малогабаритных источников электроэнергии ведутся работы по применению нанотехнологий и коммерциализации производства на их основе новых фосфатных литий-ионных аккумуляторов [16]. Внедрение серебряно-цинковых аккумуляторов в портативную электронную технику является весьма длительным и дорогостоящим процессом. Причем, целесообразность его практического осуществления является пока дискуссионным вопросом в среде мировых производителей аккумуляторной техники. Новейшие технологии производства компактных переносных источников электропитания на основе топливных элементов и нанотрубок уже много лет восхваляются и описываются самыми красивыми словами. Однако, когда дело доходит до практического выпуска подобных электроэлементов, то фактические опытные продукты источников электропитания на основе данных технологий получаются либо слишком громоздкими, либо слишком дорогими, либо и то и другое вместе взятое [11]. Из выполненного автором краткого литературного обзора в области разработки и создания электрических аккумуляторов становится ясным следующее:

• Открытие учеными-физиками и химиками совместно с инженерно-техническими работниками аккумулирующего эффекта в двухэлектродной электрофизической системе "катод-анод", содержащей размещенный между ее электродами электролит различного агрегатного состояния, относится к числу важнейших для всей нашей земной цивилизации и выдающихся достижений человечества в области электротехники при создании перезаряжаемых химических источников постоянного электрического тока.

• За практически 150-летнюю мировую историю аккумуляторной техники учеными и специалистами различных стран мира было сделано большое количество технических разработок и изобретений, существенно продвинувших перезаряжаемые химические источники постоянного электрического тока по пути технического прогресса и их активного практического использования в промышленном производстве, на транспорте разного вида и в быту людей.

• В ближайшие годы мировая аккумуляторная отрасль с учетом постоянного роста популярности у жителей планеты Земля портативных электронных устройств различного назначения и применения во многих областях науки и техники нашего бурно развивающегося мира будет продолжать активно развиваться и совершенствоваться с целью создания компактных, высокоэффективных по удельной запасаемой электроэнергии, надежных в работе, безопасных для пользователя и окружающей среды и доступных потребителю по цене электрических аккумуляторов с оптимальными весогабаритными характеристиками.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

http://www.electrolibrary.info/history/histroryakkumul.html.
 Большой иллюстрированный словарь иностранных слов.

– М.: Русские словари, 2004. – 957 с.

3. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Харьков: Изд-во "НТМТ", 2011. – 311 с.

4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во "Точка", 2010. – 407 с.

5. 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. 6. http://akbgen.ru/istoriya.

7. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.

8. http://www.rusactive.ru/history/oneinvention/accumulator.

9. http://www.dryfit.ru/1.php.

10. http://ledbattery.blogspot.com/2011/08/blog-post.html.

11. http://www.xard.ru/post/10300.

12. http://ru.wikipedia.org/wiki/Химический\_источник\_тока.

13. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.

14. Орлов В.А. Малогабаритные источники тока. – М.: Высшая школа, 1970. – 296 с.

15. Скляренко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.

16. http://batteryinfo.ru/tag/джон-ф-даниель.

REFERENCES: 1. Available at: http://www.electrolibrary.info/history/ histroryakkumul. html (accessed 03 August 2012). 2. Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. 3. Baranov M.I. Antologiia vydaiushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 1. [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. 4. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kniga 2: Teorija elektrofizicheskih effektov i zadach [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.2, Book 2: The theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkov, Tochka Publ., 2010. 407 p. 5. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teorija elektrofizicheskih effektov i zadach [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.2, Book 1: The theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2009. 384 p. 6. Available at: http://akbgen.ru/istoriya (accessed 07 August 2012). 7. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Publ., 1989. 864 Available Dumka 8. at: p. http://www.rusactive.ru/history/oneinvention/accumulator (accessed 08 August 2012). 9. Available at: http://www.dryfit.ru/1.php (accessed 09 August 2012). 10. Available at: http://ledbattery.blogspot.com/2011/08/ blog-post.html (accessed 11 August 2012). *II*. Available at: http://www.xard.ru/post/10300 (accessed 10 August 2012). http://www.xard.ru/post/10300 (accessed 12. Khimicheskii istochnik toka (Chemical source of current) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Химический источник тока (accessed 10 August 2012). 13. Knopfel' G. Sverkhsil'nye impul'snye magnitnye polia [Ultrastrong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. 14. Orlov V.A. Malogabaritnye istochniki toka polia [Small sources of current]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1970. 296 p. 15. Skljarenko V.M., Sjadro V.V. Otkrytija i izobretenija [Discoveries and inventions]. Vesta Publ., 2009. 144 p. 16. Available Kharkov, http://batteryinfo.ru/tag/джон-ф-даниель (accessed 10 August 2012).

Поступила (received) 31.08.2012

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с., НИПКИ "Молния" Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,

тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine

#### An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 22: Invention of electric energy accumulators.

A brief essay on the history of inventing the main types of accumulators that store and supply electric energy to consumers is given.

*Key words* – history, invention, electric energy accumulators.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукин

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Проведені експериментальні дослідження впливу параметрів феромагнітного осердя на електромеханічні показники лінійного індукційно-динамічного перетворювача. Розроблена експериментальна установка, яка дозволяє визначати електромеханічні параметри перетворювача на протязі робочого процесу. Виготовлене феромагнітне осердя з чотирма радіальними розрізами, яке дозволяє регулювати висоту основи та зовнішньої обичайки. Визначені геометричні параметри осердя, які забезпечують найбільшу швидкість якоря. При певних параметрах феромагнітне осердя підвищує ефективність перетворювача до 50 %. Експериментальні дослідження з похибкою до 6 % підтверджують теоретичні розрахунки.

Проведены экспериментальные исследования влияния параметров ферромагнитного сердечника на электромеханические показатели линейного индукционно-динамического преобразователя. Разработана экспериментальная установка, позволяющая определять электромеханические параметры преобразователя в течение рабочего процесса. Изготовлен ферромагнитный сердечник с четырьмя радиальными разрезами, позволяющий регулировать высоту основания и наружной обечайки. Установлены геометрические параметры сердечника, обеспечивающего наибольшую скорость якоря. При определенных параметрах ферромагнитный сердечник повышает эффективность преобразователя до 50%. Экспериментальные исследования с погрешностью до 6 % подтверждают теоретические расчеты.

### введение

Линейные индукционно-динамические преобразователи (ЛИДП) применяются для обеспечения ударных механических импульсов значительной величины и высокоскоростного разгона различных объектов на коротком активном участке.

ЛИДП используются в быстродействующих электрических аппаратах и электромагнитных клапанах ответственного исполнения, в мобильных перфораторах и ударных устройствах различного назначения. Они применяются для систем очистки и разгрузки емкостей, бункеров и фильтров, для быстродействующих форсунок топливной аппаратуры, для испытательных стендов на ударные воздействия, для перспективных баллистических лазерных гравиметров, для пусковых систем и катапульт различного назначения, для сейсмических источников, предназначенных для поиска полезных ископаемых и зондирования Земли. ЛИДП разрабатываются для противообледенительных систем самолетов, ЛЭП и др. объектов. В качестве ускорителей ЛИДП разрабатываются для устройств дополнительного ускорения подвижных объектов, для защиты объектов и помещений от нежелательного в них проникновения. Перспективными сферами их применения являются защита информации на цифровых носителях при несанкционированном доступе, разработка пусковых аэрокосмических установок и систем метеоритной защиты Земли. В промышленности ЛИДП используются для ударно-конденсаторной сварки, штамповки, клепально-сборочных работ, для электродинамической сепарации и измельчения порошков, для магнитноимпульсного уплотнения порошков входящих в композитные составы и др. [1-11].

Как правило, ЛИДП выполняются без ферромагнитного сердечника (ФС), что обусловлено быстрым протеканием рабочего процесса, значительными величинами возбуждаемых импульсных магнитных полей и ограничениями по массогабаритным показателям. Однако ФС, охватывающий неподвижный индуктор, который возбуждается от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), может существенно перераспределить магнитные поля в ЛИДП, снижая рассеяние в окружающее пространство и увеличивая поле в активной зоне якоря [12]. Тем самым может улучшиться электромагнитная совместимость с близко расположенными электронными устройствами и экологическая чистота для окружающего персонала, а также могут повыситься электромеханические показатели ЛИДП. Однако указанные положительные эффекты могут произойти только при определенных параметрах ФС [13].

Существенным фактором, ограничивающим применение ФС в ЛИДП, является отсутствие эффективных математических моделей и целенаправленных экспериментальных исследований, ориентированных на выбор параметров ФС. Известные математические модели ЛИДП используют либо постоянство магнитной проницаемости, либо линейность кривой намагничивания и отсутствие насыщения стали ФС, либо равномерность распределения индуцированного тока по сечению массивного якоря, либо не учитывают тепловые процессы и изменяемое сопротивление среды при движении якоря с исполнительным элементом. Эти допущения искажают физику быстропротекающих электромагнитных, механических и тепловых процессов, что влияет на результаты расчетов. А известные экспериментальные исследования используют, как правило, ФС неизменной конфигурации, что не позволяет судить о влиянии его формы на электромеханические показатели ЛИДП.

Таким образом, теоретические исследования по выбору конфигурации ФС должны быть согласованы с экспериментальными исследованиями.

Целью статьи является экспериментальное исследование влияния геометрических параметров ФС на электромеханические параметры коаксиального ЛИДП, содержащего неподвижный индуктор, возбуждаемый от ЕНЭ апериодическим импульсом, и массивный медный якорь, к которому прикреплен стальной или керамический ударный диск.

В качестве основного исполнения принимаем ЛИДП без ФС, основные параметры которого представлены в табл.1.

Таблица 1

Параметры ЛИДП основного исполнения						
Показатель	Обозначе- ние	Величина				
Внешний диаметр индуктора, мм	$D_{ex1}$	100				
Внутренний диаметр индуктора, мм	$D_{in1}$	10				
Высота индуктора, мм	$H_1$	10				
Внешний диаметр якоря, мм	$D_{ex2}$	100				
Внутренний диаметр якоря, мм	$D_{in2}$	10				
Высота якоря, мм	$H_2$	3				
Исходное расстояние между индуктором и якорем, мм	δ	0,5				
Количество витков индуктора, шт	$N_1$	46				
Сечение шины индуктора, мм <sup>2</sup>	a×b	1,8×4,8				
Масса якоря со стальным ударным диском, кг	$m_1$	0,48				
Масса якоря с керамическим ударным диском, кг	<i>m</i> <sub>2</sub>	0,43				
Емкость ЕНЭ, мкФ	С	1660				
Напряжение ЕНЭ, В	$U_0$	310				

## ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА На рис. 1 показана экспериментальная установка

для исследования ЛИДП.

Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки для исследования ЛИДП основного исполнения (а) и ЛИДП с ФС (б)

б

а

Индуктор 1 ЛИДП состоит из многовитковой обмотки, намотанной из медной шины в два слоя и выполненной монолитной при помощи пропитки эпоксидной смолой. Дисковый якорь 2 выполнен из технической меди. К якорю прикрепляется либо ферромагнитный стальной (рис. 2), либо немагнитный керамический (рис. 3) ударные диски 3.





Рис. 3. Якорь ЛИДП с прикрепленным к нему керамическим ударным диском: вид снизу (а) и сверху (б)

Индуктор посредством токовводов 4 соединяется с ЕНЭ. Индуктор коаксиально устанавливается в составной ФС 5, выполненный с четырьмя радиальными разрезами (рис. 1,б).

Экспериментальная установка содержит каркас 6, выполненный из стальной плиты С-образной формы. Между верхней и нижней стенками каркаса 6 подвижно установлен направляющий латунный стержень 7, проходящий через центральные отверстия индуктора и якоря. Индуктор установлен на неметаллическом основании 8 на нижней стенке каркаса, а на верхней стенке каркаса установлен резистивный датчик перемещений 9. К верхней стенке каркаса крепится демпфирующая пружина (на фото отсутствует). Направляющий стержень соединен с ударным диском и подвижным контактом датчика перемещений.

На рис. 4 представлена электрическая схема экспериментальной установки.



Рис. 4. Электрическая схема экспериментальной установки для исследования ЛИДП

Питание экспериментальной установки осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и регулируется автотрансформатором ЛАТР. После трансформатора напряжение поступает на выпрямитель VA, после чего осуществляется заряд ЕНЭ С батареи электролитических конденсаторов. При достижении необходимого зарядного напряжения U<sub>0</sub> ЕНЭ отключается от сети ключом Q. При подаче сигнала с пускового устройства ПУ тиристор VT открывается, ЕНЭ разряжается на индуктор с активным сопротивлением R<sub>1</sub> и индуктивностью L<sub>1</sub>. При этом генерируется импульсное магнитное поле, которое в начале переходного процесса индуцирует ток противоположного направления в якоре. Между якорем и индуктором возникают электродинамические усилия (ЭДУ), обеспечивающие перемещение якоря с ударным диском и направляющим стержнем в вертикальном направлении. При помощи электронного осциллографа N снимаются показания резистивного датчика перемещений, а при помощи измерительного шунта *R*<sub>ш</sub> типа 75ШСММЗ-200-0,5 на осциллографе измеряется токовый импульс в индукторе.

Для формирования апериодического полярного импульса тока индуктор шунтирован обратным диодом *VD*.

С использованием расчетной методики [10] были получены электромеханические характеристики ЛИДП основного исполнения, которые представлены на рис. 5. На этом рисунке представлены изменяемые во времени: плотность тока в индукторе  $j_1$ , усредненная по сечению плотность тока в якоре  $j_2$ , величина  $f_z$ и импульс  $F_z$  электродинамических усилий (ЭДУ), которые действуют на якорь, перемещаемый на расстояние z относительно индуктора со скоростью  $V_z$ .



В момент времени *t*=1,4 мс после начала рабочего процесса индуцированный ток в якоре меняет полярность, что изменяет характер его силового воздействия: начальное отталкивание сменяется последующим притяжением, однако вследствие значительного уменьшения магнитной взаимосвязи между индуктором и якорем после перемещения последнего это воздействие незначительно.

На рис. 6 представлено распределение силовых линий и индукции магнитного поля в индукторе 1 и якоре 2 в момент максимума ЭДУ ЛИДП основного исполнения.



Рис. 6. Индуктор ЛИДП основного исполнения (а) и распределение индукции магнитного поля в момент максимума ЭДУ при наличии якоря (б)

Индексом 3 на рис. 6 обозначен немагнитный стеклотекстолитовый каркас индуктора. Как можно увидеть, в ЛИДП основного исполнения магнитное поле концентрируется в зазоре между индуктором и якорем, достигая величины индукции 2,4 Тл. Отметим, что такая величина превышает значение индукции насыщения основных электротехнических сталей.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИДП С ФС

Для расчета характеристик ЛИДП с ФС было проведено компьютерное моделирование с помощью программного пакета *COMSOL Multiphysics* 4.4, в основу которого заложен метод конечных элементов.

Для этого в цилиндрической системе координат  $\{r, z\}$  рассчитывался векторный магнитный потенциал A с использованием условия Дирихле на внешних границах расчетной области

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial (rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где  $\mu(B)$  – магнитная проницаемость материала  $\Phi C$ , зависящая от индукции магнитного поля *B*;  $\gamma$  – электропроводность элементов ЛИДП.

Составляющие вектора магнитной индукции находились по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{d(rA)}{dr}; \ B_r = -\frac{dA}{dz}.$$
 (2)

Плотность тока в якоре и ФС определялись по известному выражению

$$j = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t} \,. \tag{3}$$

ЭДУ, действующие на якорь с ударным диском, охваченные замкнутым контуром с площадью сечения *S*, рассчитывались следующим образом:

$$f_z = 0.5\phi(H(B \cdot n)) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B))dS .$$
(4)

При расчете переходных электромагнитных и электродинамических процессов ЛИДП предполагалось отсутствие механической отдачи индуктора и ФС.

### ВЛИЯНИЕ ФС НА ПОКАЗАТЕЛИ ЛИПД

Проведем анализ работы ЛИДП при использовании ФС, выполненного из стали Ст.10. Если ФС выполнен массивным (сплошным), то эффективность ЛИДП падает. Это связано с тем, что возникающие в ФС вихревые токи экранируют проникновение магнитного поля в его глубину (рис. 7,а).



Рис. 7. Распределение магнитного поля в ЛИДП с массивным (а) и шихтованным (б) ФС в момент максимума ЭДУ

Кроме того, вихревые токи в ФС при взаимодействии с током индуктора снижают силовые показатели ЛИДП. Таким образом, для того, чтобы ФС эффективно проводил магнитный поток и не ухудшал электромеханические показатели ЛИДП, его электропроводность для вихревых токов должна быть минимально возможной. Это достигается с помощью нескольких радиальных разрезов ФС или выполнения его шихтованным. В дальнейшем при расчетах будем рассматривать ФС с нулевой электрической проводимостью. А в экспериментальных исследованиях использовался коаксиальный ФС с четырьмя радиальными разрезами. На рис. 1,6 представлен ФС, охватывающий индуктор, у которого одна из четвертей сердечника вынута и показана сверху.

В поперечном сечении коаксиальный ФС 3 комбинированной формы можно представить состоящим из дискового основания 3a, охватывающего индуктор 1 снизу, и наружной обечайки 3b, охватывающей индуктор с наружной поверхности (рис. 7,б). На рис. 7,б показано распределение магнитного поля в момент максимума ЭДУ для ЛИДП с ФС, имеющего нулевую электропроводность. Рассматриваемый ФС усиливает и концентрирует магнитное поле в зоне якоря, смещая область с низким уровнем поля к основанию ФС. При этом магнитное поле практически мало выходит в окружающее пространство, т.е. осуществляется экранирование полей рассеяния.

Указанный ФС, представляемый совокупностью *i*-ых цилиндрических участков, где  $i=\{a, b\}$ , можно описать геометрическими параметрами: внешним диаметром  $D_{ex3i}$ , внутренним диаметром  $D_{in3i}$  и высотой  $H_{3i}$  *i*-го участка. Расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФС заполнено изоляцией толщиной  $\delta=1$  мм.

Геометрические параметры ФС опишем безразмерными параметрами:

$$\chi = \frac{H_{3a}}{H_1}; \ \varepsilon = \frac{H_{3b}}{H_1}. \tag{5}$$

Каждая из четырех разрезанных частей ФС состоит из наружной обечайки, формируемой тремя элементами, которые на рис. 8 обозначены буквами **a**, **б**, **в**. Указанные элементы обечайки **a**, **б**, **в** характеризуются геометрическими параметрами, соответственно,  $\varepsilon_a$ =1,0,  $\varepsilon_6$ =0,4,  $\varepsilon_в$ =0,8. Дисковое основание каждой разрезанной части ФС формируется тремя одинаковыми элементами **г**, каждый из которых характеризуется геометрическим параметром  $\chi$ =0,5. Все элементы фиксируются между собой при помощи крепежных элементов д.



Рис. 8. Элементы четверти составного ФС

В табл. 2 представлены варианты исполнений конструкций  $\Phi C$  с различными геометрическими параметрами  $\chi$  и  $\varepsilon$ . Исполнение 0 соответствует ЛИДП без  $\Phi C$ . В исполнениях 1с...6с якорь соединен со стальным ударным диском, а в исполнениях 7к и 8к – с керамическим ударным диском.

На рис. 9 показаны экспериментальные ЛИДП исполнениями 1с, 2с и 4с (табл. 2.)





Рис. 9. Экспериментальные ЛИДП исполнениями 1 с (а), 2 с (б) и 4 с (в)

На рис. 10 показан ЛИДП основного исполнения (без ФС), у которого якорь соединен с керамическим ударным диском.

Для ЛИДП с каждым исполнением  $\Phi C$  при помощи электронного осциллографа одновременно измерялся ток в индукторе  $i_1$  и перемещения якоря с ударным диском  $\Delta z$ .



Рис. 10. ЛИДП основного исполнения (без ФС) с керамическим ударным диском

На рис. 11 показаны осциллограммы указанных величин для ЛИДП без ФС (исполнение 0), для ЛИДП, у которого ФС содержит только дисковое основание (исполнение 1с) и для ЛИДП, у которого ФС содержит дисковое основание и наружную обечайку (исполнение 3с).

Результаты экспериментальных исследований сведены в табл. 2.

Резу	/льта	ты	эксп	ерим	ент	альны	их исследова	ний ЛИДП	
							$\Delta_7(t)$ MM		

Таблина 2

Испол-	<i>т</i> я,	χ,	ε,	$t_m$ ,	<i>t</i> +,	$I_{1m}$ ,	<u>Д</u> Д	(t), 1 ри <i>1</i>	мм *	V <sub>0</sub> , 1	м/с
нение	КГ	o,e,	o,e,	мс	мс	кА	0,75	1,5	5,0	Экспе-	Расчет
							мс	мс	мс	римент	
0	0,48	0,0	0,0	0,20	2,0	1,813	1,35	3,9	15,0	3,0	3,2
1c	0,48	1,0	0,0	0,195	3,0	1,760	1,00	4,0	17	3,4	4,05
2c	0,48	1,0	1,0	0,19	3,0	1,713	1,40	4,8	21	4,2	4,3
3c	0,48	1,0	1,4	0,185	2,6	1,706	1,50	5,0	22	4,4	4,4
4c	0,48	1,0	2,2	0,19	2,5	1,766	1,50	5,1	21,5	4,3	4,4
5c	0,48	0,5	1,4	0,19	3,0	1,760	1,40	4,4	19	3,8	4,2
6c	0,48	1,5	1,4	0,19	3,0	1,920	1,55	5,1	22,5	4,5	4,4
7к	0,43	0,0	1,0	0,195	3,0	2,080	1,40	4,0	16,0	3,2	3,5
8к	0,43	1,0	1,4	0,19	3,6	1,973	1,70	5,4	22,5	4,5	4,7

ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2014. №5



Рис. 11. Осциллограммы тока индуктора и перемещения якоря ЛИДП исполнений: 0 (а), 1с (б) и 3с (в)

В ней представлены амплитуда импульса тока в индукторе  $I_{1m}$ , время достижения током индуктора максимального значения  $t_m$ , длительность положительного полупериода тока индуктора  $t_+$ , перемещение якоря  $\Delta z$  в момент времени  $t^*$ , измеренная и рассчитанная средние скорости якоря с ударным диском  $V_0$  на участке перемещения.

Полученные результаты показывают, что применение ФС с геометрическими параметрами, указанными выше, повышает эффективность ЛИДП.

На рис. 12 показана зависимость средней скорости якоря с ударным стальным диском в зависимости от геометрических параметров ФС. На рис.12 представлены экспериментальные 1 и расчетные 2 значения  $V_0$  для ЛИДП с ФС, экспериментальные 3 и расчетные 4 значения для ЛИДП без ФС. Наибольшая средняя скорость  $V_0$  достигается при геометрических параметрах ФС  $\chi$ =1 и  $\varepsilon$  =1.4. Для этого ЛИДП скорость якоря с ударным диском возрастает на 47 % по сравнению с ЛИДП основного исполнения (без ФС). Необходимо отметить, что применение ФС незначительно уменьшает ток в индукторе (до 6 %), уменьшает время достижения током индуктора максимального значения (до 8 %), увеличивает длительность положительного полупериода тока индуктора (до 30 %).



Рис. 12. Зависимость средней скорости якоря ЛИДП от высоты внешней обечайки ФС при χ=1 (а) и от высоты дискового основания ΦС при ε =1,4 (б)

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами расчетов. При этом относительная погрешность не превышает 6 %.

Как показывают экспериментальные и расчетные результаты, ЛИДП с керамическим ударным диском обеспечивает большую скорость, чем ЛИДП со стальным ударным диском (см. исполнения 3с и 8к в табл. 2). Наибольшую скорость обеспечивает ЛИДП с керамическим якорем, у которого ФС имеет следующие геометрические параметры  $\chi=1,0, \varepsilon=1,4$ . По сравнению с ЛИДП основного исполнения средняя скорость такого преобразователя за счет ФС увеличивается на 50 %.

#### выводы

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования, которые согласуются между собой с точностью до 6 %, показали, что ФС с четырьмя радиальными разрезами повышает эффективность ЛИДП. Установлены геометрические параметры ФС, обеспечивающего наибольшую среднюю скорость якоря. По сравнению с ЛИДП основного исполнения без ФС средняя скорость якоря возрастает до 50 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walls W.A., Weldon W.F., Pratap S.P. et al. Application of electromagnetic guns to future naval platforms // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – Vol.35. – №1. – pp. 262-267.

2. Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2010. – N<sup>1</sup>(7). – C. 22-28.

3. Туманов И.Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы многофракционных жидких продуктов // Электротехника. - 2013. -№8. - C. 48-52.

4. Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an inductiondynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // Measurement Techniques. - Vol.56. - Issue 10. - pp. 1098-1104.

5. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Устройство защиты компьютерной информации от несанкпионированного доступа на основе индукционнодинамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – С. 5-10.

6. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transsactions on Magnetics. - 2012. - Vol.48. - №11. - pp. 3315-3318.

7. Bissal A., Magnusson J., Salinas E. et al. On the design of ultra-fast electromechanical actuators: a comprehensive multiphysical simulation model // 6th International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF). - 19-21 June 2012. - pp. 1-4.

8. Косцов Э.Г. Микроэлектромеханический ускоритель твердотельных объектов // Автометрия. - 2012. - Т.48. -№4. - C. 93-103.

9. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range // IEEE Transactions on Magnetics. - 2003. - Vol.39. - №1. - pp. 310-313. 10. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. - 2011. - Vol.82. - №2. - pp. 104 -110.

11. Чемерис В.Т. Многоступенчатый индукционный ускоритель макротел: поиск технических решений // Артиллерийское и стрелковое вооружение. - 2011. - № 3(40). - С. 45-56.

12. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. - 2012. - №6. - С. 20-27.

13. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter // Proceedings of the 13<sup>th</sup> cryogenics 2014 IIR international conference. – Praha, Czech Republic. - 7-11 April, 2014. - Paper ID: 012. pp. 268-275.

REFERENCES: 1. Walls W.A., Weldon W.F., Pratap S.P. et al. Application of electromagnetic guns to future naval platforms. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, vol.35, no.1, pp. 262-267. 2. Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring. Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony - Modern information technologies in the field of security and defense, 2010, no.1(7), pp. 22-28. 3. Tumanov I.E. Parametric electromagnetic exciter low frequency mechanical vibrations for monitoring, measuring and dispensing multifractional liquid products mass. Electrical engineering, 2013, no.8, pp. 48-52. 4. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter. Measurement Techniques, 2014, vol.56, no.10, pp. 1098-1104. 5. Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V. F., Shchukin I.S. Device for computer information security from unauthorized access on the basis of an induction-dynamic motor. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2008, no.2, pp. 5-10. 6. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept. IEEE Transsactions on Magnetics, 2012, vol.48, no.11, pp. 3315-3318. 7. Bissal A., Magnusson J., Salinas E. et al. On the design of ultra-fast electromechanical actuators: a comprehensive multi-physical simulation model. 6th Int. Conf. on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF), 19-21 June 2012, pp. 1-4. 8. Koscov E.G. A microelectromechanical accelerator solid objects. Avtometriya - Avtometriya, 2012, vol.48, no.4, pp. 93-103. 9. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, vol.39, no.1, pp. 310-313. 10. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. Russian electrical engineering, 2011, vol.82,

no.2, pp. 104-110. 11. Chemeris V.T. Multistage induction accelerator macrobodies: technical solutions. Artilleriiskoe i strelkovoe vooruzhenie -Artillery and small arms, 2011, no.3(40), pp. 45-56. 12. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Influence of ferromagnetic core parameters on induction-type dynamic motor efficiency. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2012, no.6, pp. 20-27. 13. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter. Proceedings of the 13th cryogenics 2014 IIR int. conf. Praha, Czech Republic, 7-11 April, 2014, Paper ID: 012, pp. 268-275.

#### Поступила (received) 15.05.2014

Болюх Владимир Федорович<sup>1</sup>, д.т.н, проф., Олексенко Сергей Владимирович<sup>1</sup>, аспирант,

Щукин Игорь Сергеевич<sup>1,2</sup>, к.т.н, доц.,

<sup>1</sup> Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт",

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

тел/phone +38 057 7076427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> ООО Фирма "ТЭТРА, Ltd",

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh<sup>1</sup>, S.V. Oleksenko<sup>1</sup>, I.S. Schukin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup> Firm Tetra, LTD

21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Experimental study of ferromagnetic core parameters influence on electromechanical characteristics of a linear induction-dynamic converter.

Experimental studies of ferromagnetic core parameters action on electromechanical characteristics of a linear induction-dynamic converter are conducted. An experimental installation is designed and built to determine the converter electromechanical parameters during its operation. A ferromagnetic core with four radial slots made allows regulating the height of the base and the outer shell. The core geometric parameters providing the highest speed of the armature are specified. Under certain parameters, the ferromagnetic core increases the converter efficiency up to 50%. The experimental results confirm the analytical studies within 6 % error.

Key words - linear induction-dynamic converter, core, experimental studies, electromechanical characteristics.

Р.П. Бондар

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІБРАТОРА З ПРИВОДОМ ВІД ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА З НЕЯВНОПОЛЮСНИМ ЯКОРЕМ

Розглянуто вібратор з приводом від лінійного двигуна зворотно-поступального руху. На підставі розробленої математичної моделі, отримано рівняння для визначення енергетичних характеристик вібратора з приводом від лінійного двигуна з неявнополюсним якорем. Проведено порівняльний розрахунок енергетичних характеристик за допомогою отриманої аналітичної моделі, та імітаційної Simulink-моделі параметри якої, визначені на підставі скінченноелементного аналізу.

Рассмотрен вибратор с приводом от линейного двигателя возвратно-поступательного движения. На основании разработанной математической модели, получены уравнения для определения энергетических характеристик вибратора с приводом от линейного двигателя с неявнополюсным якорем. Выполнен сравнительный расчет энергетических характеристик с помощью полученной аналитической модели, и имитационной Simulink-модели параметры которой, определены на основании конечно-элементного анализа.

#### ВСТУП

Вібраційні технології є основою багатьох сучасних технологічних процесів пов'язаних з переміщенням та обробкою матеріалів, ущільненням, сортуванням, гранулюванням, тощо. Зазвичай, для реалізації зворотно-поступального руху, застосовуються обертові двигуни з відповідними механічними передачами. Невисока ефективність обертових приводів зумовлена значними механічними втратами в передавальних пристроях, а недостатня надійність – динамічними перевантаженнями в передачах та недовговічністю застосовуваних в них типових серій асинхронних двигунів [1].

Використання вібраційних пристроїв з приводом від лінійних двигунів (ЛД) має свої особливості, які визначаються їх конструктивним виконанням та характером робочого процесу. До переваг таких приводів можна віднести відсутність механічних передач, що підвищує надійність та зменшує механічні втрати. Відсутність лобових частин обмотки у коаксіальних ЛД, покращує вібростійкість. Разом з тим, застосування їх у якості вібраторів, має також свої недоліки. Зокрема, коефіцієнт корисної дії ЛД є нижчим від аналогічного показника обертового. Крім того, це резонансні машини, які досить чутливі до зміни параметрів навантаження.

Підвищення ефективності роботи пристроїв з приводом від ЛД та визначення їх оптимальних параметрів, є актуальною задачею. Для її вирішення необхідна побудова відповідних комплексних математичних моделей, які враховують специфіку роботи таких пристроїв, та залежність характеристик вібратора від параметрів ЛД.

На сьогоднішній день розроблено низку аналітичих та чисельних моделей, які дозволяють провести розрахунок характеристик коаксіального ЛД з постійними магнітами [2-6]. В роботі [7] наведено лінійну модель вібратора з приводом від ЛД з магнітами на якорі. Шляхом лінеаризації рівнянь динаміки, були отримані вирази для основних енергетичних характеристик вібратора. Також, наведено деякі обмеження щодо застосування отриманих виразів на практиці.

Перевагою лінійних моделей є їх відносна простота і можливість проведення математичного аналізу впливу тих чи інших параметрів ЛД на характеристики вібратора. Наведена модель, хоча й відрізняється зручністю, проте, не зовсім точно відображає реальні фізичні процеси, що відбуваються при роботі вібратора, а тому потребує уточнення. Те, що в даній моделі електромагнітна сила не залежить від положення якоря, може призвести до хибних висновків при дослідженні енергетичних характеристик вібратора. Так, зокрема, з неї слідує, що амплітуда коливань якоря (при однакових значеннях амплітуди потокозчеплення) зростає із зменшенням полюсної поділки машини т, тобто  $\lim_{\tau \to 0} X_{am} = \infty$ , й теоретично може бути більшою

за полюсну поділку. Оскільки при переході якоря через положення  $x_a = \pm \tau/2$  напрям електромагнітної сили змінюється на протилежний, то на значних амплітудах електромеханічна система має досліджуватись на більш точних математичних моделях. Крім того, ККД, розрахований на підставі даної моделі, не залежить від струму та амплітуди коливань. Це призводить до збільшення похибки розрахунку при зростанні навантаження вібратора.

Метою даної роботи є побудова уточненої математичної моделі вібратора з приводом від ЛД з неявнополюсним якорем, яка враховує нелінійність тягової характеристики, а також дослідження, на основі отриманої моделі, процесів енергоперетворення.

### ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ

Для ненасиченої машини із постійними параметрами рівняння балансу напруг в обмотці статора, у випадку неявнополюсного якоря, запишеться в наступному вигляді

$$u = iR_s + \frac{d\Psi}{dt} = iR_s + \frac{d\Psi_{pm}(x_a)}{dx_a} \cdot \frac{dx_a}{dt} + L\frac{di}{dt}, \quad (1)$$

де u – напруга живлення; i – струм статора;  $R_s$  – активний опір обмотки статора;  $\Psi = \Psi_{pm}(x_a) + Li$  – потокозчеплення обмотки;  $\Psi_{pm}(x_a)$  – залежність потокозчеплення, що створюється постійними магнітами від положення якоря  $x_a$  (переміщення якоря відносно стато-

ра);  $\frac{dx_a}{dt} = v_a$  — швидкість якоря; L — індуктивність обмотки. Відповідна схема заміщення показана на

рис. 1,а. Тоді, миттєве значення потужності ЛД визначиться виразом

$$p_1 = ui = i^2 R_s + \frac{d\Psi_{pm}(x_a)}{dx_a} v_a i + L \frac{di}{dt} i .$$
<sup>(2)</sup>

Рис. 1. Еквівалентна електрична (а) та механічна (б) схеми вібратора

В рівнянні (2) доданок  $i^2 R_S$  визначає втрати потужності на активному опорі обмотки статора. Останній доданок визначає наведену внаслідок зміни струму ЕРС. Вона не виконує корисної роботи і її потуж-

ність  $L\frac{di}{dt}i$ , витрачається на збільшення енергії маг-

нітного поля при зростанні струму, а при зменшенні струму перетворюється в електричну енергію і віддається (за винятком втрат) в мережу. Додаток  $\frac{d\Psi_{pm}(x_a)}{dx_a}v_a i$  становить потужність, яка передається

через повітряний проміжок, тобто електромагнітну потужність Pe. Звідси, отримаємо вираз для електромагнітної сили у вигляді

$$F_e = F_{es} = \frac{P_e}{v_a} = \frac{d\Psi_{pm}(x_a)}{dx_a}i,$$
(3)

де F<sub>es</sub> – електромагнітна сила (синхронна складова) зумовлена дією поля постійних магнітів.

Якщо прийняти за початок координат положення відносно якого здійснюються коливання якоря (положення при якому потокозчеплення від поля магнітів дорівнює нулю), то залежність потокозчеплення, зумовленого полем постійних магнітів від положення якоря ЛД, можна виразити у вигляді [5]

$$\Psi_{pm}(x_a) = \Psi_m \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_a\right),\tag{4}$$

де  $\Psi_m$  – амплітудне значення потокозчеплення; т – полюсна поділка.

Тоді, миттєве значення електромагнітної сили запишеться:

$$F_{es} = \frac{d\Psi_{pm}(x_a)}{dx_a} i = \frac{\Psi_m \pi}{\tau} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x_a\right) i, \qquad (5)$$

де  $\frac{\Psi_m \pi}{\Gamma} = K_F$  – коефіцієнт електромагнітної сили, що

входить до складу рівнянь моделі [7].

Представимо залежність електромагнітної сили від переміщення у більш зручному вигляді. Симетричність кривої тягового зусилля F<sub>es</sub> відносно осі абсцис та осі ординат (рис. 2), дає можливість представити дану залежність поліномом другого порядку виду [2]

$$F_{es} = F_{e1} + F_{e2} x_a^2 \,. \tag{6}$$

 $F_{es} = F_{e1} = \Psi_m \frac{\pi}{\tau} i$ . Коефіцієнт  $F_{e2}$  визначиться з умо-Як слідує з рівнянь (5, 6), якщо  $x_a = 0$ , то

ви, що  $F_{es} = 0$ , коли  $x_a = \pm \tau/2$ , тому  $F_{e2} = -\frac{4\Psi_m \pi}{\tau^3} i$  .

Отже, матимемо

$$F_{es} = \frac{\Psi_m \pi}{\tau} i - \frac{4\Psi_m \pi}{\tau^3} x_a^2 i .$$
 (7)

Доповнимо рівняння балансу напруг (1) рівнянням балансу сил, отриманим за наступних умов. Параметри машини є сталими і не залежать від режиму роботи. Еквівалентна механічна схема вібратора (рис. 1,б) містить нерухомий статор 1 з обмоткою 2. Якір 3 коливається під дією електромагнітної сили  $F_{es}(t)$  відносно статора на пружинах 4 з жорсткістю k. Вважатимемо, що коефіцієнти в'язкого тертя b та жорсткості k є еквівалентними, тобто враховують відповідні коефіцієнти вібратора разом з навантаженням. За таких умов механічну систему можна розглядати, як одномасову. Система координат пов'язана із статором, з початком в положенні механічної рівноваги якоря за відсутності струму ЛД. Наведеним припущенням відповідає наступне рівняння

$$m_a \frac{d^2 x_a}{dt^2} = F_{es} - kx_a - b\frac{dx_a}{dt},$$
(8)

де *m<sub>a</sub>* – маса якоря; *x<sub>a</sub>* – переміщення якоря відносно статора; F<sub>es</sub> – електромагнітна сила (7); k – еквівалентний коефіцієнт жорсткості пружин вібратора та навантаження;  $b = b_v + b_{load} - сумарний коефіцієнт в'яз$ кого тертя вібратора та навантаження; b<sub>v</sub> – коефіцієнт в'язкого тертя вібратора; b<sub>load</sub> – коефіцієнт в'язкого тертя навантаження.

3 рівнянь (1) та (7) слідує, що ЕРС, індукована полем постійних магнітів, є функцією переміщення та швидкості якоря, а електромагнітна сила, є функцією переміщення якоря та струму статора.

### ЛІНЕАРИЗАЦІЯ РІВНЯНЬ ДИНАМІКИ ВІБРАТОРА

Для того, щоб врахувати нелінійність тягової характеристики, будемо використовувати енергетичний метод. При цьому нелінійну функцію  $F_{es}(x_a, i)$ , замінимо гармонічною функцією виду  $F_{es}(i)k_{nl}$  таким чином, щоб робота, виконувана останньою за цикл, дорівнюроботі дійсної електромагнітної вала сили  $X_{am}$ X

$$\int_{-X_{am}}^{am} F_{es}(i)k_{nl}dx_a = \int_{-X_{am}}^{am} F_{es}(x_a,i)dx_a$$
. Тоді, коефіцієнт

приведення, що враховує нелінійність тягової характеристики, визначиться з виразу

$$k_{nl} = \frac{\int\limits_{-X_{am}}^{X_{am}} F_{es}(x_a, i) dx_a}{\int\limits_{-X_{am}}^{X_{am}} F_{es}(i) dx_a},$$
(9)

де  $F_{es}(i)$  – гармонічна функція виду

$$F_{es}(i) = K_F i = \frac{\Psi_m \pi}{\tau} i.$$
 (10)

Механічна робота, що виконується електромагнітною силою при переміщенні якоря на амплітуду  $X_{am}$ , розрахована на підставі виразу (10), буде дорівнювати

$$W_{mecs.m} = \int_{-X_{am}}^{X_{am}} F_{es}(i) dx_a = \frac{\Psi_m \pi}{\tau} \int_{-X_{am}}^{X_{am}} i dx_a .$$
(11)

Фактично ж (враховуючи нелінійність тягової характеристики) механічна робота на цій ділянці становитиме

$$W_{mecs} = \int_{-X_{am}}^{X_{am}} F_{es}(x_a, i) dx_a , \qquad (12)$$

де  $F_{es}(x_a,i)$  – залежність електромагнітної сили від положення якоря (тягова характеристика) визначена, наприклад, за виразом (7).

Заштрихована область, вище кривої електромагнітної сили  $F_{es}(x_a, l)$  (рис. 2), за умови, що струм є незмінним, відповідає тій кількості механічної енергії, яка становить різницю між механічною енергією лінійної моделі, та фактичною механічною енергією.



При роботі в якості приводу вібратора, струм ЛД є змінним, й для визначення роботи потрібно враховувати залежність струму від переміщення якоря. Слід зазначити, що при коливальному характері руху, під час переміщення якоря від початкового положення на амплітуду  $X_{am}$ , відбувається також перетворення кінетичної енергії, яка має максимальне значення в точці  $x_a = 0$ , в потенціальну енергію, що накопичується в пружних елементах. Проте сума цих енергій (в усталеному режимі) на всьому проміжку залишається постійною, і тому, не враховується при визначенні коефіцієнту приведення.

Вважатимемо, що залежності струму та переміщення є гармонічними функціями виду

$$x_a = X_{am} \cos \omega t; \quad i = I_m \cos(\omega t + \theta), \quad (13)$$

де  $\theta$  – фазовий кут коливань (кут між векторами переміщення та струму). Рівняння (13) являють собою параметричне рівняння еліпса, виключивши з яких кут  $\omega t$ , знайдемо залежність струму від переміщення

$$i = \frac{I_m}{X_{am}} \left( x_a \cos\theta \pm \sin\theta \sqrt{X_{am}^2 - x_a^2} \right).$$
(14)

На інтервалі руху якоря від положення  $-X_{am}$  до  $X_{am}$  струм змінюється за законом  $i = \frac{I_m}{X_{am}} \left( x_a \cos \theta + \sin \theta \sqrt{X_{am}^2 - x_a^2} \right)$ . Інтегруючи на

цьому проміжку, визначимо механічну роботу на підставі виразу (11):

$$W_{mecs.m} = \int_{-X_{am}}^{X_{am}} \frac{\Psi_m \pi I_m}{X_{am} \tau} \left( x_a \cos \theta + \sin \theta \sqrt{X_{am}^2 - x_a^2} \right) dx_a =$$

$$= \frac{\Psi_m I_m \pi^2 X_{am} \sin \theta}{2\tau}.$$
(15)

Дійсна механічна робота (12) на цій ділянці визначиться як

$$W_{mecs} = \int_{-X_{am}}^{X_{am}} \frac{\Psi_m I_m \pi}{X_{am} \tau} \left( x_a \cos \theta + \sin \theta \sqrt{X_{am}^2 - x_a^2} \right) dx_a - \int_{-X_{am}}^{X_{am}} \frac{4\Psi_m I_m \pi}{X_{am} \tau^3} x_a^2 \left( x_a \cos \theta + \sin \theta \sqrt{X_{am}^2 - x_a^2} \right) dx_a = (16)$$
$$= \frac{\Psi_m I_m \pi^2 X_{am} \sin \theta \left( \tau^2 - X_{am}^2 \right)}{2\tau^3}.$$

Тоді, коефіцієнт приведення становитиме

$$k_{nl} = \frac{W_{mecs}}{W_{mecs.m}} = 1 - \frac{X_{am}^2}{\tau^2} \,. \tag{17}$$

З виразів (15, 16) слідує, що значення механічної енергії в обох випадках пропорційні синусу фазового кута коливань θ, але їх відношення (коефіцієнт приведення), від цього кута не залежить (17).

### ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІБРАТОРА

Далі, як і раніше, будемо вважати, що переміщення та струм є синусоїдними. Дійсну електромагнітну силу замінимо гармонічною функцією виду  $F_{es}(i) = K_F k_{nl} i = \frac{\Psi_m \pi}{\tau} k_{nl} i$ , робота якої за період дорівнює роботі дійсної електромагнітної сили. Такою ж гармонічною функцією представимо ЕРС  $E = K_E k_{nl} v_a = \frac{\Psi_m \pi}{\tau} k_{nl} v_a$ . За таких умов, отримаємо систему диференційних рівнянь з постійними коефі-

цієнтами, що описують динаміку вібратора, яка може бути записана в комплексній формі:

$$\underbrace{\underline{U}}_{m_{a}} = \underline{I}(R_{s} + j\omega L) + K_{E}k_{nl}\underline{V}_{a};$$

$$- m_{a}\omega^{2}\underline{X}_{a} = K_{F}k_{nl}\underline{I} - k\underline{X}_{a} - j\omega b\underline{X}_{a},$$
(18)

де ω – кутова частота напруги джерела живлення та частота коливань якоря.

З другого рівняння системи (18) визначимо переміщення

$$\underline{X}_{a} = \frac{K_{F}k_{nl}\underline{I}(k-m_{a}\omega^{2})}{(k-m_{a}\omega^{2})^{2}+\omega^{2}b^{2}} - \frac{jK_{F}k_{nl}\underline{I}\omega b}{(k-m_{a}\omega^{2})^{2}+\omega^{2}b^{2}},$$

звідки амплітуда коливань дорівнює

$$X_{am} = \frac{K_F k_{nl} I_m}{\sqrt{\left(k - m_a \omega^2\right)^2 + \omega^2 b^2}} .$$
 (19)

Підставивши в (19) коефіцієнт приведення (17), отримаємо рівняння з якого знайдемо амплітуду коливань:

ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2014. №5

$$X_{am} = \frac{\tau^{3} \sqrt{\left(k - m_{a}\omega^{2}\right)^{2} + \omega^{2}b^{2} + \frac{4\Psi_{m}^{2}\pi^{2}I_{m}^{2}}{\tau^{4}}}}{2\Psi_{m}\pi I_{m}} - \frac{\tau^{3} \sqrt{\left(k - m_{a}\omega^{2}\right)^{2} + \omega^{2}b^{2}}}{2\Psi_{m}\pi I_{m}}.$$
(20)

Прирівнявши похідну за частотою з (20) нулю  $\partial X_{am}/\partial \omega = 0$ , визначимо частоту, на якій амплітуда буде максимальною

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_a} - \frac{b^2}{2m_a^2}} \,. \tag{21}$$

Даний вираз повністю співпадає з результатом отриманим в роботі [7].

3 другого рівняння системи (18) визначимо:

$$j\omega \underline{X}_{a} = \underline{V}_{a} = \frac{j\omega K_{F} k_{nl} \underline{I}}{k - m_{a} \omega^{2} + j\omega b}.$$
 (22)

Підставивши (22) в перше рівняння системи (18), отримаємо

$$\underline{U} = \underline{I} \left( R_s + j\omega L + \frac{j\omega K_E K_F k_{nl}^2}{k - m_a \omega^2 + j\omega b} \right),$$

звідки видно, що повний опір системи має електричну

 $\underline{Z}_e = R_s + j\omega L$ , та механічну  $\underline{Z}_{mec} = \frac{j\omega K_E K_F k_{nl}^2}{k - m_a \omega^2 + j\omega b}$ 

складові. За аналогією з електричними колами, активний  $R_{mec}$  та реактивний  $X_{mec}$  механічні опори визначаться відповідно як дійсна та уявна частини комплексного механічного опору

$$\underline{Z}_{mec} = \frac{K_E K_F k_{nl}^2 \omega^2 b}{\left(k - m_a \omega^2\right)^2 + \omega^2 b^2} + \frac{j \omega K_E K_F k_{nl}^2 \left(k - m_a \omega^2\right)}{\left(k - m_a \omega^2\right)^2 + \omega^2 b^2}.$$
(23)

Вважаючи, що електромагнітна сила та переміщення є гармонічними функціями, механічну потужність можна подати у вигляді

$$P_{mec} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} F_e(t) v_a(t) dt = F_e V_a \cos\theta^*,$$

де  $F_e$ ,  $V_a$  – середньоквадратичні (ефективні) значення відповідно електромагнітної сили та швидкості якоря;  $\theta^* = \pi/2 - \theta$  – кут фазового зсуву між електромагнітною силою та швидкістю;  $\theta$  – фазовий кут коливань. Враховуючи, що  $V_a = E/K_E k_{nl} = IZ_{mec}/K_E k_{nl}$ ,  $F_e = K_F K_{nl}I$ і використовуючи поняття трикутника механічного опору (звідки  $R_{mec} = Z_{mec} \cos\theta^*$ ), можемо записати

$$P_{mec} = \frac{K_F k_{nl} I^2 Z_{mec} \cos\theta^*}{K_E k_{nl}} = \frac{K_F}{K_E} I^2 R_{mec} .$$
  
Оскільки  $R_{mec} = \frac{K_E K_F k_{nl}^2 \omega^2 b}{\left(k - m_a \omega^2\right)^2 + \omega^2 b^2} ,$  то  
$$P_{mec} = \frac{K_F^2 I^2 k_{nl}^2 \omega^2 b}{\left(k - m_a \omega^2\right)^2 + \omega^2 b^2} .$$
 (24)

В прийнятій розрахунковій моделі ЛД магнітні втрати нехтуються, тому, активна потужність P<sub>1</sub> споживання енергії, витрачається на утворення механічної потужності  $P_{mec}$  та компенсацію електричних втрат  $\Delta P_e$ . Враховуючи, що  $\Delta P_e = I^2 R_s$ , тоді

$$P_{\rm l} = P_{mec} + \Delta P_e = \frac{K_F^2 I^2 k_{nl}^2 \omega^2 b}{\left(k - m_a \omega^2\right)^2 + \omega^2 b^2} + I^2 R_s \,.$$

Корисна потужність  $P_2$  менше за механічну на величину механічних втрат  $\Delta P_{mec}$ , тобто

$$P_{2} = \frac{K_{F}^{2}I^{2}k_{nl}^{2}\omega^{2}b}{\left(k - m_{a}\omega^{2}\right)^{2} + \omega^{2}b^{2}} - \frac{b_{v}\omega^{2}X_{am}^{2}}{2}$$
  

$$\text{de } \Delta P_{mec} = \frac{b_{v}}{T}\int_{t_{1}}^{t_{1}+T} v_{a}^{2}dt = \frac{b_{v}\omega^{2}X_{am}^{2}}{2}.$$

Отже, ККД вібратора визначиться як

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{mec} - \Delta P_{mec}}{P_{mec} + \Delta P_e} =$$

$$= \frac{2K_F^2 I^2 k_{nl}^2 \omega^2 b - b_v \omega^2 X_{am}^2 \left( \left( k - m_a \omega^2 \right)^2 + \omega^2 b^2 \right)}{2K_F^2 I^2 k_{nl}^2 \omega^2 b + 2I^2 R_s \left( \left( k - m_a \omega^2 \right)^2 + \omega^2 b^2 \right)}$$

Враховуючи (19), отримаємо

$$\eta = \frac{K_F^2 k_{nl}^2 \omega^2 (b - b_v)}{K_F^2 k_{nl}^2 \omega^2 b + R_s \left( \left( k - m_a \omega^2 \right)^2 + \omega^2 b^2 \right)}.$$
 (25)

Для знаходження частоти, що відповідає максимальному ККД, визначимо з (25) похідну за  $\omega$  та прирівняємо її до нуля  $\partial \eta / \partial \omega = 0$ , звідки

$$\left(k - m_a \omega^2\right)^2 = -2m_a \omega^2 \left(k - m_a \omega^2\right).$$

Даному рівнянню відповідають два корені, один від'ємний, інший – додатній  $\omega = \sqrt{k/m_a} = \omega_0$ , і є шу-каним значенням частоти.

Для визначення залежності ККД від амплітуди, дослідимо похідну від (25) за амплітудою X<sub>ат</sub>.

Враховуючи, що 
$$K_F = \Psi_m \pi / \tau$$
 і  $k_{nl} = \frac{\tau^2 - X_{am}^2}{\tau^2}$ , ККД

запишеться

n

$$I = \frac{\Psi_m^2 \pi^2 (\tau^2 - X_{am}^2)^2 \omega^2 (b - b_v)}{\Psi_m^2 \pi^2 (\tau^2 - X_{am}^2)^2 \omega^2 b + \tau^6 R_s ((k - m_a \omega^2)^2 + \omega^2 b^2)}.$$
(26)

Рівняння  $\partial \eta / \partial X_{am} = 0$  не має дійсних коренів. Отже, залежність ККД від амплітуди не має екстремумів. Аналіз виразу свідчить, що похідна від ККД за амплітудою, у всьому діапазоні зміни амплітуди, має від'ємне значення. Звідси слідує те, що ця залежність є спадною, й зі зростанням амплітуди коливань, ККД буде погіршуватись.

Важливим показником, який впливає на ефективність роботи ЛД приводу вібратора, є параметри навантаження. Максимум залежності ККД від коефіцієнту в'язкого тертя навантаження знаходимо з рівняння (26), поклавши  $\partial \eta / \partial b = 0$ . При цьому вважається, що амплітуда коливань, як і інші параметри вібратора, є сталими

$$\tau^{6}R_{s}\omega^{2}b^{2} - 2\tau^{6}R_{s}\omega^{2}b_{v}b - \tau^{6}R_{s}\left(k - m_{a}\omega^{2}\right)^{2} - \Psi_{m}^{2}\pi^{2}\left(\tau^{2} - X_{am}^{2}\right)^{2}\omega^{2}b_{v} = 0.$$

Вирішуючи дане рівняння, і залишаючи додатній корінь, отримаємо

$$b = b_{v} + \sqrt{b_{v}^{2} + \frac{\left(k - m_{a}\omega^{2}\right)^{2}}{\omega^{2}}} + \frac{\Psi_{m}^{2}\pi^{2}\left(\tau^{2} - X_{am}^{2}\right)^{2}b_{v}}{R_{s}\tau^{6}} .$$
(27)

### НЕЛІНІЙНА ПОСТАНОВКА

Розгляд задачі в нелінійній постановці має на меті порівняння розрахунків, отриманих на підставі представленої аналітичної моделі, та більш детальної чисельної моделі. В нелінійній постановці розглядається коаксіально-лінійний ЛД із зубчастою структурою статора та постійними магнітами на якорі. Механічна схема вібратора відповідає показаній на рис. 1,6. Система рівнянь, що описує перехідні електромеханічні процеси ЛД має наступний вигляд:

$$u = iR_s + \frac{d\Psi(x_a, i)}{dt};$$
  
$$m_a \frac{d^2 x_a}{dt^2} = F_e(x_a, i) - kx_a - b\frac{dx_a}{dt},$$

де  $\Psi(x_a,i)$ ,  $F_e(x_a,i)$  – відповідно потокозчеплення обмотки статора ЛД та електромагнітна сила в залежності від положення якоря та струму статора. Зазначені залежності визначені на підставі вирішення польової задачі чисельним методом скінченних елементів, постановка якої, подана в роботі [2]. Далі, проведено чисельне дослідження характеристик вібратора з параметрами, представленими в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри вібратора та ЛД					
Маса якоря <i>m</i> <sub>a</sub> , кг	75				
Коефіцієнт в'язкого тертя вібратора b <sub>v</sub> , кг/с	250				
Коефіцієнт в'язкого тертя навантаження b <sub>load</sub> , кг/с	1200				
Активний опір обмотки статора R <sub>s</sub> , Ом	3,1				
Полюсна поділка τ, м	0,059				
Амплітуда потокозчеплення магнітів $\Psi_m$ , Вб	2,34				
Коефіцієнт жорсткості пружин k, H·м	687153				
Індуктивність обмотки L, мГн	35,562				

Для розрахунку характеристик вібратора використовується імітаційна Simulink-модель наведена в [6]. Результати порівняльного розрахунку ілюструє рис. 3, на якому показано залежності амплітуди коливання та ККД від частоти для двох значень струму – 10 А та 30 А. Розрахунок проводився трьома способами: на підставі виразів (20, 26), за допомогою Simulink-моделі та згідно наступних рівнянь [7]:

$$X_{am} = \frac{I_m \Psi_m \pi}{\tau \sqrt{(k - m_a \omega^2)^2 + b^2 \omega^2}};$$
 (28)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{K_F^2 \omega^2 (b - b_v)}{K_F^2 b \omega^2 + R_s \left( (k - m_a \omega^2)^2 + b^2 \omega^2 \right)}.$$
 (29)

Амплітуда коливань якоря представлена у відносних одиницях, розрахованих за виразом  $X_{*am} = X_{am}/X_b$ , де  $X_{am}$  – амплітуда коливань, що відповідає певному значенню частоти або струму,  $X_b$ – базисна амплітуда,  $X_b = \tau/2$ . Як видно з рис. 3, при невеликих значеннях амплітуди коливання якоря та струму, розрахунки практично співпадають. З підвищенням струму, амплітуда, розрахована за виразом (28), перевищує половину полюсної поділки, тобто точність розрахунку суттєво знижується.



Рис. 3. Результати порівняльного розрахунку

Значення струму 30 А відповідає режиму, коли дійсна амплітуда коливань наближається до половини полюсної поділки, тобто мають місце максимальні струмове та механічне навантаження. При цьому, часові функції струму та електромагнітної сили значно відрізняються від синусоїдних. Це ілюструє рис. 4, де показано осцилограми переміщення, електромагнітної сили та струму статора, отримані за допомогою Simulink-моделі, для випадку коли  $\omega \approx \omega_0$ , I = 30 A.



ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2014. №5

Результати розрахунку ККД (рис. 3,б), згідно рівняння (29), мають достатню точність при невеликих значеннях струмів. Оскільки дане рівняння не враховує зміну струму, то при збільшенні струму вираз має невелику точність. Також, можна відмітити погіршення ККД із зростанням амплітуди коливань, що підтверджує результати аналізу викладеного вище.

#### ВИСНОВКИ

В роботі отримано аналітичні вирази для енергетичних характеристик вібратора (амплітуди коливань та ККД), що враховують нелінійність тягової характеристики лінійного двигуна.

На основі отриманої моделі показано, що ефективність роботи вібратора значно залежить від співвідношення робочої амплітуди та полюсної поділки, а також параметрів навантаження. Визначено, що зі зростанням амплітуди коливань (за умови підтримання струму ЛД сталим), ККД вібратора погіршується.

Результати порівняльного розрахунку свідчать про те, що точність отриманих виразів вища, ніж при розрахунках за рівняннями (28, 29), отриманими в роботі [7], в межах граничних струмових та механічних навантажень вібратора.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черняев В.И. Вибромолоты и вибропогружатели с виброударостойкими электродвигателями // Исследование вибрационного и виброударного погружения свай. Сб. статей. Под ред. Головачева А.С. – М.: Транспорт, 1968. – С. 5-15.

2. Голенков Г.М., Бондар Р.П., Макогон С.А., Богаєнко М.В., Попков В.С. Моделювання роботи електричного вібратора з коаксіально-лінійним індукційним двигуном при різних законах регулювання // Технічна електродинаміка. -2007. - №2. - C. 54-59.

3. A. Canova, G. Gruosso, M. Repetto. Synthesis of a tubular linear IPM motor. COMPEL, Int. J. Comput. Math. Elect. Electron. Eng., 2001, vol.20, no.3, pp. 777-795.

4. N. Bianchi, S. Bolognani, D. Corte, F. Tonel. Tubular Linear Permanent Magnet Motors: An Overall Comparison. IEEE Trans. on Ind. Applicat., March/April 2003, vol.39, no.2, pp. 466-475.

5. Бондар Р.П. Електромеханічні характеристики коаксіально-лінійного синхронного вібратора установки для безтраншейної проходки горизонтальних свердловин // Технічна електродинаміка. - 2008. - №2. - С. 31-35.

6. Бондар Р.П., Голенков Г.М., Подольцев О.Д. Розрахунок робочих характеристик лінійного двигуна зворотнопоступального руху в пакеті Matlab/Simulink // Електротехніка і електромеханіка. - 2010. - №4. - С. 13-17.

7. Бондар Р.П., Голенков Г.М., Литвин О.Ю., Подольцев О. Л. Моделювання енергетичних характеристик вібратора з лінійним електричним приводом // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - 2013. - №2. - С. 66-74.

REFERENCES: 1. Cherniaev V.I. Vibromoloty i vibropogruzhateli s vibroudarostoikimi elektrodvigateliami [Vibratory hammers and vibratory drivers with vibration-proof electric motors]. Issledovanie vibratsionnogo i vibroudarnogo pogruzheniia svai. Sb. statei. Pod red. Golovacheva A.S. Probe of vibrational and vibroimpact dipping of piles. Collection of articles. Edited by A.S. Golovachev], Moscow, 1968, pp. 5-15. 2. Golenkov G.M., Bondar R.P., Makogon S.A., Bogaenko M.V., Popkov V.S. Modeling of work of the electric vibrator with tubular linear induction motor at various laws of regulation. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics, 2007, no.2, pp. 54-59. 3. A. Canova, G. Gruosso, M. Repetto. Synthesis of a tubular linear IPM motor. COMPEL-Int. J. Comput. Math. Elect. Electron. Eng., 2001, vol.20, no.3, pp. 777-795. 4. N. Bianchi, S. Bolognani, D. Corte, F. Tonel. Tubular Linear Permanent Magnet Motors: An Overall Comparison. IEEE Trans. on Ind. Applicat., March/April 2003, vol.39, no.2, , pp. 466-475. 5. Bondar R.P. Electromechanical characteristics of tubular linear synchronous vibrator of trenchless pipelayer. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics, 2008, no.2, pp. 31-35. 6. Bondar R.P., Golenkov G.M., Podoltsev A.D. Modeling of characteristics of alternating motion linear motor in Simulink/Matlab software package. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2010, no.4, pp. 13-17. 7. Bondar R.P., Golenkov G.M., Lytvyn A.Yu., Podoltsev A.D. Modelling of power characteristics of the vibrator with a linear electric drive. Electromechanichni i energozberigayuchi systemy - Electromechanical and energy saving systems, 2013, no.2(22), pp. 66-74.

Надійшла (received) 30.09.2014

Бондар Роман Петрович, к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури,

03680, Київ, пр. Повітрофлотський, 31, тел/phone +38 044 2415510, e-mail: rpbondar@gmail.com

#### R.P. Bondar

Kyiv National University of Construction and Architecture 31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv-37, 03680 Ukraine

Power characteristics of a vibrator with a linear nonsalient-pole armature motor drive.

A vibrator with a linear reciprocating motor drive is studied. On the basis of the mathematical model developed, equations of power characteristics of the vibrator with a linear nonsalientpole armature motor drive are obtained. Comparative calculations of the power characteristics by means of the analytical model obtained and a Simulink-model with FEM-specified parameters are carried out.

*Key words* – linear motor drive, power characteristics, vibrator.

И.А. Костюков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВНОСИМЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ И АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ СКАНИРОВАНИИ СПИРАЛЬНОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПРОВОЛОКИ ПОЛЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Запропоновані критерії для оцінювання величин внесених індуктивностей та активних опорів при дослідженні спірального феромагнітного дроту броні одножильних силових кабелів параметричним електромагнітним перетворювачем. Досліджена зміна запропонованих критеріїв в діапазоні частот від 100 Гц до 100 кГц при різному кроці спіралі. Обґрунтована можливість використання соленоїдів у якості датчиків для визначення впливу кроку накладання броні на втрати, що обумовлені протіканням повздовжніх та вихрових струмів.

Предложены критерии для оценки величин вносимых индуктивностей и активных сопротивлений при исследовании спиральной ферромагнитной проволоки брони одножильных силовых кабелей параметрическим электромагнитным преобразователем. Исследовано изменение предложенных критериев в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц при различном шаге спирали. Обоснована возможность применения соленоидов в качестве датчиков для определения влияния шага наложения брони на потери, обусловленные протеканием продольных и вихревых токов.

### ВВЕДЕНИЕ

В ряде приложений кабельной техники возникает задача определения влияния конструктивных параметров элементов конструкции кабеля со сложной геометрической формой, в частности спиральной, на электромагнитные характеристики кабельной линии. Непосредственное определение экспериментальным путем такого влияния может быть затруднено, как вследствие необходимости иметь достаточно дорогостоящее оборудование, так и вследствие наличия сложной картины магнитного поля в элементах конструкции кабеля в реальных условиях. Последнее обстоятельство может быть обусловлено, например, явлениями искажения картины поля из-за необходимости учета магнитных полей не только от собственной жилы кабеля, но и от соседних кабелей линии. Учитывая сказанное, в некоторых случаях для приближенного определения влияния конструктивных параметров на электромагнитные характеристики кабельной линии, целесообразно обосновать использование электромагнитных преобразователей. В частности, с продольным зондирующем магнитным полем H<sub>z</sub>, поскольку при исполнении их обмоток с достаточно большим отношением длины к диаметру зондирующее поле, по величине равное линейной плотности тока в соленоиде, с высокой степенью достоверности можно считать близким к однородному.

С учетом сложной геометрической формы исследуемого образца возникает необходимость учета и анализа некоторых факторов, определяющих импеданс датчика с образцом, и не учитываемых при зондировании продольным полем прямолинейных образцов. К таким факторам относится, например, радиус образующего цилиндра спирали. С увеличением шага спирали указанный выше фактор, в частности, может привести к необходимости работать при очень низком коэффициенте заполнения, который в практике применения электромагнитных преобразователей при контроле прямолинейных образцов определяется из следующего выражения [1, 2]:

 $\eta = a^2 / a_n^2 \,. \tag{1}$ 

где *а* – радиус исследуемого образца, *a<sub>n</sub>* – радиус электромагнитного преобразователя.

При контроле электромагнитных параметров прямолинейных образцов параметрическими электромагнитными преобразователями информацию об электромагнитных характеристиках изделия получают на основании измерения абсолютных значений приращений, как индуктивностей, так и активных сопротивлений [2, 3]. При зондировании продольным полем образцов со сложной геометрической формой, с учетом необходимости определения влияния какоголибо параметра образца (например, шага спирали) на электромагнитные параметры датчика, возникает также задача поиска новых критериев для определения влияния рассматриваемого параметра на индуктивные и активные характеристики датчика.

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обоснование чувствительности активных и индуктивных характеристик параметрического вихретокового преобразователя к шагу наложения спиральной проволоки, а также выбор критериев для определения указанной чувствительности. Исследование характера изменения предложенных критериев в широком диапазоне частот.

### КОРРЕЛЯЦИЯ ВНОСИМЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ И АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ СПИРАЛЬНОГО ОБРАЗЦА

С целью обоснования чувствительности импеданса параметрического электромагнитного преобразователя к шагу спирали, определенный интерес представляет исследование корреляции вносимых индуктивностей и активных сопротивлений при различном шаге наложения спиральной проволоки и при сканировании проволоки продольным магнитным полем в широком диапазоне частот. Для случая прямолинейного образца при расчете коэффициента линейной корреляции между указанными выше величинами естественно ожидать его значимости, поскольку

© И.А. Костюков

совокупный  $tg\delta$  и соответствующая ему добротность схемы Q, при отсутствии влияния паразитных емкостей, будут определяться как активным сопротивлением, так и индуктивностью датчика. Так, для последовательной схемы замещения датчика [4].

$$tg\delta = \frac{U_R}{U_L} = \frac{R_s}{\omega L_s},\tag{2}$$

где  $L_s$  – индуктивность,  $R_s$  – активное сопротивление,  $\omega$  – угловая частота,  $U_R$  – падение напряжения на активном сопротивлении,  $U_L$  – падение напряжения на индуктивности.

В практике применения как трансформаторных, так и параметрических электромагнитных преобразователей, с целью нивелирования влияния краевых эффектов на результаты измерений, длина образца, обычно, принимается равной или несколько превышающей длину электромагнитного преобразователя. При контроле спиральных образцов, учитывая необходимость корректного сравнения величин вносимого импеданса при различном шаге спиральной проволоки, необходимо определить критерии для оценки величин вносимых индуктивностей и активных сопротивлений, независящие от длины датчика и образца.

Перед тем как формулировать критерии для спирального образца, целесообразно проанализировать корреляцию между значениями приращений индуктивности и активного сопротивления при контроле прямолинейных образцов при увеличении длины образца и связанным с этим увеличением длинны датчика. Учитывая указанное выше обстоятельство относительно совместного влияния  $L_s$  и  $R_s$  на  $tg\delta$  схемы (формула (2)), естественно ожидать значимой линейной корреляции и между абсолютными значениями приращения активного сопротивления и индуктивности при увеличении длинны образца и датчика. Такая корреляция должна наблюдаться в широком диапазоне частот, за исключением, быть может, достаточно низких, на которых при данных конструктивных параметрах (сечение обмоточного провода датчика, сечение исследуемого образца, количество витков), слабо выражены действие скин-эффекта и реакция вихревых токов в исследуемом образце. А также слишком высоких, на которых ярко выражено действие размагничивающего фактора. Наличие или отсутствие значимой корреляции здесь будет определяться, очевидно, точностью измерительной аппаратуры и ее возможностями фиксировать малые приращения индуктивностей или сопротивлений.

В качестве примера можно привести коэффициенты корреляции между приращением указанных выше параметров датчика для соленоидов с диаметром  $D_0 = 32$  мм, и с количеством витков  $W_1 = 310$ ;  $W_2 = 355$ ;  $W_3 = 400$ ;  $W_4 = 445$ ;  $W_5 = 490$ ;  $W_6 = 535$ ;  $W_7 = 580$ ;  $W_8 = 625$ ;  $W_9 = 670$ . Следует отметить, что отношение диаметра к длине для указанных соленоидов в зависимости от количества витков менялось от 5 (для соленоида с наименьшим количеством витков) до 10,9 (для соленоида с наибольшим количеством витков). Для соленоидов с наименьшим отношением диаметра к длине, по-видимому, нет возможности говорить о достаточной степени однородности зондирующего поля. Данный фактор может оказывать свое влияние, как на величины вносимого импеданса, так и на собственную индуктивность датчика при отсутствии в нем образца. При измерениях длина прямолинейной проволоки во всех случаях совпадала с длиной соленоида.

Таблица 1

Собственные активные и индуктивные параметры датчика и величины их приращений

Ис: индукт сопро	ходные гивност отивлеі	значени и и акти ния датч	1я вного ика	Прирап и актин датчин	цение и зного с ка с пря обра	індуктив опротивл імолиней зцом	ности 1ения іным
10 к	Гц	100 i	сГц	10 к	Гц	100 f	сГц
<i>L</i> , мкГн	<i>R</i> , Ом	<i>L</i> , мкГн	<i>R</i> , Ом	<i>L</i> , мкГн	<i>R</i> , Ом	<i>L</i> , мкГн	<i>R</i> , Ом
590	3,66	588,7	4,87	33	1,97	8,7	6,41
683	4,17	681	5,61	34,8	2,09	9,2	6,61
778	4,69	775	6,3	40	2,46	11,6	7,95
873	5,26	871	7,12	46	2,72	12,4	8,88
963	5,74	961	7,81	49,7	3,11	11,8	9,96
1049	6,28	1046	8,48	53	3,34	14	10,4
1131	6,8	1128	9,2	60,4	3,5	17	11,5
1231	7,35	1227	10,1	68	4,1	19,8	13
1310	7,9	1306	10,5	71	4,1	21,5	13,6

Для приведенных в таблице приращений индуктивности и активного сопротивления коэффициенты корреляции между этими величинами составляют 0,99 и 0,97, соответственно, для частот 10 кГц и 100 кГц. Указанное обстоятельство - следствие линейной зависимости, определяемой формулой (2). Увеличение значения приращений индуктивности и активного сопротивления здесь - следствие увеличения величины зондирующего магнитного потока при увеличении длинны соленоида. Таким образом, непосредственно величины приращений индуктивностей и активных сопротивлений не могут быть выбраны в качестве чувствительного критерия для оценки влияния шага наложения спирали на параметры датчика с образцом, поскольку в этих величинах находит свое отображение также и увеличение количества витков датчика, связанное с увеличением длинны образца при увеличении шага спирали. Зависимость этих параметров от длины соленоида подтверждается высокой корреляцией между приращениями индуктивностей и активных сопротивлений при увеличении длины исследуемого образца и датчика. Учитывая, что индуктивность датчика с образцом определяется полным потокосцеплением, то в качестве критерия N (с размерностью индуктивности), определяющего величину магнитного потока в датчике, независящего от его длинны, целесообразно принять отношение приращения индуктивности соленоида к его количеству витков. Так, для всех данных, приведенных в табл. 1, такое отношенное составляет 0,1 мкГн для частоты 10 кГц. При частоте 100 кГц отношение приращения индуктивности к количеству витков уменьшается до 0,026-0,032 мкГн. Непостоянство данного отношения здесь вызвано, видимо, наличием некоторой дисперсии при измерениях на частоте 100 кГц, которая здесь более выражена, чем при измерениях на частоте 10 кГц. При частоте 1000 Гц отношение приращения индуктивности к количеству витков принимает значение от 0,335 мкГн до 0,36 мкГн. При измерениях на частоте 100 Гц предложенный параметр для оценки величин вносимых индуктивностей принимает значения от 0,51 мкГн до 0,57 мкГн. Колебания этого параметра здесь, видимо, можно считать незначительными и связанными со случайными погрешностями измерений. Постоянство этого отношения, для прямолинейного образца является признаком работы на начальном участке кривой намагничивания. Таким образом, отношение приращения индуктивности к количеству витков является характеристикой датчика, независимой от его длины. В качестве критерия К, определяющего приращение активного сопротивления, целесообразно принять отношение приращения активного сопротивления к количеству витков соленоида. Для данных, приведенных в табл. 1, такое отношение составляет 5,8·10<sup>-3</sup> - 6,5·10<sup>-3</sup> при частоте 10 кГц и увеличивается до 18·10<sup>-3</sup> – 21·10<sup>-3</sup> при частоте 100 кГц (более выражено влияние скин-эффекта и реакция вихревых токов в исследуемом образце). При исследовании спиральной проволоки, при произвольном шаге ее наложения, с учетом сложности учета части индуктивности датчика, которая обусловлена магнитным потоком, пересекающим основание образующего цилиндра, а также возможных погрешностей измерения вопрос об исследовании корреляции предложенных критериев для величин приращения индуктивностей и активных сопротивлений требует дополнительного исследования.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНОСИМОГО В ДАТЧИК ИМПЕДАНСА ПРИ РАЗНОМ ШАГЕ СПИРАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

С целью качественного определения влияния шага намотки ферромагнитной спиральной проволоки на параметры датчика были проведены ряд измерений импеданса датчика при различном шаге спирали, но при одном и том же радиусе образующего цилиндра спирали. Измерения проводились портативным цифровым измерителем иммитанса DE-5000. Тестовые частоты: 100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц. Уровень зондирующего сигнала 0,6 В. Диаметр образующего цилиндра спирали составлял 11 мм. Диаметр спиральной проволоки составлял 3 мм. Максимальный шаг спирали составлял 25 мм, 35 мм, 40 мм, 45 мм, 60 мм, 70 мм, 100 мм, 140 мм, 150 мм, соответственно, для количества витков датчика  $W_1 = 310$ ;  $W_2 = 355; W_3 = 400; W_4 = 445; W_5 = 490; W_6 = 535;$  $W_7 = 580; W_8 = 625; W_9 = 670.$  При этом следует отметить, что при одном и том же радиусе образующего цилиндра увеличение шага приводит к уменьшению количества витков исследуемого образца.

На рис. 1-5 приведены значения предложенного критерия для приращения индуктивности, в зависимости от количества витков катушки, при линейной регрессии.



Рис. 1. Значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества витков соленоида при частоте 100 Гц



Рис. 2. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества витков соленоида при частоте 120 Гц



Рис. 3. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества



Рис. 4. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества витков соленоида при частоте 10 кГц



Рис. 5. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества витков соленоида при частоте 100 кГц

Увеличение критерия, равного отношению приращения индуктивности к количеству витков при увеличении их количества, вместе с увеличением шага спирали, свидетельствует об увеличении магнитного потока в датчике. Это связано с увеличением влияния продольной магнитной проницаемости проволоки, при увеличении шага спирали, на параметры датчика.

На рис. 6-7 приведены значения предложенного критерия для приращения активного сопротивления в зависимости от количества витков катушки для оценки величин вносимых активных сопротивлений при линейной регрессии при измерениях на частоте 100 кГц.



Рис. 6. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых активных сопротивлений в зависимости от количества витков соленоида при частоте 100 кГц



Рис. 7. Критерий для оценки вносимых активных сопротивлений при частоте 1 кГц

Следует отметить существенно меньшие значения критерия N для спирального образца по сравнению с прямолинейным образцом, при низких частотах зондирующего поля. При частоте 100 Гц минимальное значение критерия N для прямолинейного образца составляет 0,51 в то же время максимальное значения критерия N для спирального образца составляет 0,3. При увеличении частоты указанная разница несколько уменьшается. При частоте 100 кГц максимальное значение критерия N составляет 0,032 для прямолинейного образца и 0,024 для спирального.

### АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ КРИТЕРИЯМИ ПРИРАЩЕНИЯ ИМПЕДАНСА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ ЗОНДИРУЮЩЕГО ПОЛЯ

Учитывая отмеченную выше корреляцию между приращениями активных сопротивлений и индуктивностей, следствие формулы (2), возникает интерес к определению корреляции между значениями предложенных критериев при одной и той же частоте зондирующего поля и при разном шаге наложения спиральной проволоки. Ожидать такую корреляцию тем более оправдано, с учетом монотонного возрастания критериев K и N с увеличением шага спирали и количества витков датчика. Так, при частоте зондирующего поля 1 кГц коэффициент корреляции между величинами предложенных критериев К и N составляет  $r_{K,N(1 \text{ к}\Gamma \mu)} = 0,96$ . В то же время линейная корреляция между предложенными критериями, измеренными на частоте 100 Гц, практически отсутствует. Коэффициент корреляции здесь составляет  $r_{K,N(0,1 \text{ к}\Gamma \text{ ц})} = 0,26$ . При малом количестве результатов измерений говорить о значимости такого коэффициента корреляции нельзя. Коэффициент корреляции между предложенными критериями при частоте 100 кГц (данные на рис. 5 и рис. 6) составляет  $r_{K,N(100 \text{ к}\Gamma \text{ ц})} = 0,77$ . Причина уменьшения коэффициента корреляции – увеличение влияния погрешностей измерения, связанных с недостаточной чувствительностью прибора к малым приращениям активного сопротивления при измерениях на низких частотах и малым приращениям индуктивности при измерениях на высоких частотах. Наглядное действие таких погрешностей на величины критериев К и N видно, например, на рис. 5. Из результатов, приведенных на рис. 5, следует значительно более высокий разброс экспериментальных данных при частоте 100 кГц, чем при частоте 120 Гц (рис. 2). При контроле спиральных образцов, по сравнению с контролем прямолинейных, влияние случайных погрешностей существенно повышается, поскольку величины приращений индуктивностей и активных сопротивлений здесь существенно меньше.

### выводы

Показана достаточно высокая чувствительность импеданса параметрического вихретокового преобразователя к шагу спирального образца. Предложены критерии для оценки величин вносимых индуктивностей и активных сопротивлений при исследовании спиральной проволоки с учетом влияния шага спирали на параметры датчика. Характер изменения предложенных критериев с увеличением шага спирали связан с увеличением влияния продольной магнитной проницаемости и, соответственно, продольной компоненты напряженности магнитного поля  $H_z$  на параметры датчика с образцом.

С учетом различных длин датчиков и, соответствующих им, различных величин импеданса, которые определяют различную напряженность зондирующего магнитного поля на поверхности поволоки, анализ с применением предложенных критериев целесообразно проводить при работе на начальном участке кривой намагничивания. При исследовании в широком диапазоне частот, от 100 Гц до 100 кГц, на которых в различной степени выражено влияние скин-эффекта, размагничивающего фактора, реакции вихревых токов в исследуемом образце совместное применение предложенных критериев целесообразно только при наличии между ними корреляции. Отсутствие корреляции указывает на существенные погрешности в измерениях какого-либо параметра. Совместное применение критериев наиболее целесообразно при промежуточных частотах, например, в диапазоне от 1 кГц до 10 кГц. Что верно, как минимум, при используемых здесь диаметре обмоточного провода катушки и диаметре проволоки стальной спирали. При низких и при высоких частотах целесообразно только применение одного из предложенных критериев. Соответственно, N при низких, и К при больших. Учитывая малые величины абсолютных значений предложенных критериев, вызванные необходимостью находить отношения приращения параметров датчика к его количеству витков, с целью показать увеличение магнитного потока в датчике, целесообразно их использование только для качественной оценки влияния продольной магнитной проницаемости на величину магнитного потока в контролируемом изделии при разном шаге спиральной проволоки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.Е. Бесконтактный вихретоковый преобразователь для контроля диаметра и удельного электрического сопротивления немагнитных цилиндрических изделий в полях различной ориентации // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – №2. – С. 5-10.

2. Себко В.П., Юданова Н.Н., Ноздрачева Е.Л., Жаркова О.С. Расчет параметрического и трансформаторного электромагнитных преобразователей. – Х.: НТУ "ХПИ", 2004. – 72 с.

3. Егоров А.В., Поляков В.В., Иваков С.В. Измерительновычислительный комплекс для определения удельной электропроводности и магнитной проницаемости методом вихревых токов // Ползуновский вестник. – 2010. – №2. – С. 129-132. 4. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Х.: НТУ "ХПИ", 2012. – 108 с.

REFERENCES: 1. Bondarenko V.E. Beskontaktnyj vihretokovyj preobrazovatel' dlja kontrolja diametra i udel'nogo elektricheskogo soprotivlenija nemagnitnyh cilindricheskih izdelij v poljah razlichnoj orientacii [Contactless eddy-current converter for diameter and specific conductivity control of cylindrical products in magnetic fields of different orientation]. Elektrotehnika i elektromehanika - Electrical engineering & electromechanics, 2003, no.2. pp. 5-10. 2. Sebko V.P., Judanova N.N., Nozdracheva E.L., Zharkova O.S. Raschet parametricheskogo i transformatornogo elektromagnitnyh preobrazovatelej [Calculation of parametric and transformer electromagnetic converters]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2004. 72 p. 3. Egorov A.V., Poljakov V.V., Ivakov S.V. Izmeritel'no-vychislitel'nyj kompleks dlja opredelenija udel'noj elektroprovodnosti i magnitnoj pronicaemosti metodom vihrevyh tokov [Metrical and calculative complex for determination specific conductivity and magnetic permeability by eddycurrent method]. Polzunovskij vestnik - The Polzunov Bulletin, 2010, no.2. pp. 129-132. 4. Besprozvannyh A.V., Naboka B.G. Matematicheskie modeli i metody rascheta jelektroizoljacionnyh konstrukcij [Mathematical models and methods of calculation electrical insulation constructions]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2012. 108 p.

### Поступила (received) 16.05.2014

Костюков Иван Александрович, аспирант, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076010, e-mail: Kostiukow.Ivan@yandex.ru

#### I.A. Kostiukov

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Research on added inductance and resistance during spiral ferromagnetic wire scanning with magnetic field of a parametric eddy-current sensor.

Criteria for estimation of added inductance and resistance during spiral ferromagnetic wire scanning of single-core power cable armour by means of a parametric electromagnetic converter are proposed. Research into variation of the introduced criteria in the frequency range from 100 Hz up to 100 kHz for different wire spiral steps is done. Possibility of using coils as sensors for determination armour step influence on power losses caused by eddy-currents and circulating currents in power cable line is shown.

*Key words* – power cable, spiral wire, armour, axial magnetic permeability, eddy-current sensor.

О.В. Лавриненко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОММУТИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КЛАПАНОМ ОТБОРА ПРОБ ВЫПУСКНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Запропонована процедура аналізу перехідних процесів в каскаді управління електромагнітним клапаном для відбору проб випускних газів двигуна внутрішнього згорання, що базується на класичному методі, отримані аналітичні вирази для струмів і напруг на основних елементах каскаду, що дозволяють визначити оптимальні по швидкодії та надійності значення параметрів цих елементів.

Предложена процедура анализа переходных процессов в каскаде управления электромагнитным клапаном для отбора проб выпускных газов двигателя внутреннего сгорания, базирующаяся на классическом методе, получены аналитические выражения для токов и напряжений на основных элементах каскада, позволяющие определить оптимальные по быстродействию и надежности значения параметров этих элементов.

Постановка проблемы. Для диагностирования работы двигателей внутреннего сгорания в ряде случаев отбирают с помощью специальных электромагнитных клапанов пробы их отработавших газов на определенных этапах рабочего процесса, при этом время открытия и закрытия клапана должно быть как можно меньшим по сравнению с продолжительностью открытого состояния клапана. Как известно, время открытия клапана можно сократить за счет увеличения электромагнитной силы, то есть увеличения тока в обмотке электромагнита, а время закрытия клапана можно уменьшить путем увеличения силы его возвратной пружины. Однако увеличение тока в обмотке электромагнита сопровождается ростом перенапряжения при его выключении, что снижает надежность работы устройства. Введение же демпфирующих цепочек, снижающих указанные перенапряжения, приводит к росту времени закрытия клапана, ухудшая быстродействие устройства. Таким образом, возникает задача достижения компромисса между надежностью и быстродействием электромагнитного клапана и оптимизации параметров элементов устройства управления электромагнитом. Анализ литературы [1, 2] показывает, что в системах диагностики и управления двигателей внутреннего сгорания коммутация электромагнитов осуществляется с помощью транзисторов, предельные параметры которых существенно превышают реально существующие напряжения и токи в конкретном устройстве, полученные экспериментально. Теоретических анализ переходных процессов, как правило, не выполняется.

Цель статьи – теоретически выполнить анализ переходных процессов в устройстве управления электромагнитным клапаном и найти параметры основных элементов этого устройства, обеспечивающих наиболее благоприятное их протекание.

В последние годы наибольшее распространение для управления электромагнитными клапанами двигателей внутреннего сгорания (ДВС) получили электронные системы, выходной каскад которых выполняется по схеме, показанной на рис. 1.

Питающее напряжение U подается на схему от бортовой сети силовой установки (например, аккумулятора), а импульсы управления  $U_y$  подаются между базой и эмиттером транзистора VT от специального



Рис. 1. Схема выходного каскада электронной системы управления электромагнитным клапаном отбора проб отработавших газов ДВС

вычислительного устройства, выполненного в современных системах на микропроцессоре (МК) [2].

МК синхронно с вращением коленчатого вала ДВС в каждом его обороте (если ДВС двухтактный) или вдвое реже (если ДВС четырехтактный) вырабатывает импульсы U<sub>V</sub>, длительность которых определяет продолжительность t<sub>и</sub> импульсов тока в катушке электромагнита (ЭМ) и время открытого состояния клапана для отбора проб отработавших газов (ОГ) ДВС. Величина  $t_{\mu}$  зависит от моментов отпирания и запирания VT, причем ток в катушке ЭМ при этом изменяется не мгновенно, а с некоторой скоростью, согласно законам коммутации [3]. Исчезающий при запирании VT магнитный поток ЭМ создает электродвижущую силу самоиндукции, вследствие чего могут появиться опасные для коммутирующего элемента перенапряжения. Для их снижения применяют демпфирующие резистивноемкостные цепи  $R_2C$ , которые, однако, могут отрицательно повлиять на быстродействие ЭМ. В связи с этим возникает необходимость исследования и оптимизации параметров демпфирующей цепи, которая защитила бы VT от пробоя и существенно не повлияла бы на процесс отбора проб ОГ.

Упрощенная схема замещения выходного каскада приведена на рис. 2.





© О.В. Лавриненко

Элементы  $R_1$  и L – соответственно активное сопротивление и индуктивность ЭМ, K – ключ, имитирующий VT.

При анализе процессов в схеме будем пренебрегать межвитковой паразитной емкостью катушки ЭМ и считать транзистор идеальным ключом, что близко к действительности при правильном его выборе. В случае отпирания VT, что соответствует замыканию K, к цепи  $R_1L$  прикладывается постоянное  $U_1$  и процессы в ней описываются следующим уравнением [3].

$$L\frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = U \;,$$

решение которого, как известно, записывается в виде

$$i = \frac{U}{R_1} \left( 1 - e^{-t_{\rm M}/\tau_1} \right) = \frac{U}{R_1} \gamma , \qquad (1)$$

где  $i_1$  – мгновенное значение тока в цепи при первом положении K; t – время;  $\tau_1$  – постоянная времени,

$$\tau_1 = L_1 / R_1$$
;  $\gamma = 1 - e^{t_{\rm H} / \tau_1}$ .

Из (1) видно, что максимальное значение тока в катушке ЭМ имеет место по окончании импульса, с ростом длительности  $t_{\mu}$  которого указанное значение увеличивается.

При запирании VT, происходящем по окончании упомянутого импульса, ЭМ отключается и отбор пробы ОГ прекращается вследствие закрытия клапана. Этому случаю на рис. 2 соответствует переход ключа из первого положения во второе, то есть его размыкание. Теперь для послекоммутационной цепи дифференциальное уравнение имеет вид:

$$L\frac{di_2}{dt} + (R_1 + R_2)i_2 + U_c = U, \qquad (2)$$

где  $i_2$  – мгновенное значение тока в цепи при втором положении K;  $U_C$  – мгновенное значение напряжения на емкости  $C_2$ . Согласно первому и второму законам коммутации [3] можно записать

$$\frac{di_2}{dt \mid t=0} = \frac{U - U_c(-0) - (R_1 + R_2) \cdot i_2(+0)}{L}, \quad (3)$$

где  $U_C(-0)$  – напряжение на емкости в момент, непосредственно предшествующий коммутации;  $i_2(+0)$  – ток цепи в первый момент после коммутации, когда ключ находится во втором положении.

В данном случае  $U_C(-0) = 0$ , поскольку перед размыканием *К* конденсатор должен быть разряжен для нормальной работы выходного каскада системы. Также, с учетом (1) и первого закона коммутации

$$i_2(+0) = \frac{U}{R_1}\gamma, \qquad (4)$$

в связи с чем соотношение (3) представим в виде

$$\frac{di_2}{dt \mid t=0} = \frac{U}{L} \cdot \left[ 1 - \gamma \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right] = \frac{U}{L} B .$$
 (5)

Решение уравнения (2) в общем случае записывается следующим образом [3]

$$=A_1 e^{K_1 t} + A_2 e^{K_2 t}, (6)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – произвольные постоянные интегрирования;  $K_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$  – корни характеристического уравнения цепи;  $\delta = \frac{R_1 + R_2}{2L}$  – показатель зату-

хания;  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  – круговая частота собственных незатухающих колебаний цепи.

Найдя скорость изменения тока для момента коммутации t = 0 (размыкание ключа) из (6) и приравняв ее правой части соотношения (5), запишем

$$A_1 K_1 + A_2 K_2 = \frac{U}{L} B . (7)$$

Кроме того, из соотношения (6) для t = 0 имеем

$$i_{2(0)} = A_1 + A_2$$
,

с учетом (4) получим

$$A_1 + A_2 = \frac{U}{R_1} \gamma \,. \tag{8}$$

Выражения (8) и (7) образуют систему, решения которой представляются в виде:

$$A_{1} = -\frac{U\left(\frac{K_{2}}{R_{1}}\gamma - \frac{B}{L}\right)}{K_{1} - K_{2}}, \ A_{2} = -\frac{U\left(\frac{K_{1}}{R_{1}}\gamma - \frac{B}{L}\right)}{K_{1} - K_{2}}.$$
 (9)

Следовательно, закон тока ЭМ во времени

$$\dot{t}_{2} = -\frac{U}{K_{1} - K_{2}} \left[ \left( \frac{K_{2}}{R_{1}} \gamma - \frac{B}{L} \right) e^{K_{1}t} - \left( \frac{K_{1}}{R_{1}} \gamma - \frac{B}{L} \right) e^{K_{2}t} \right].$$
(10)

Взаимосвязь между током и напряжением на конденсаторе известна [3].

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_2 t^{-1}$$

Приняв во внимание (9), (10) после соответствующих преобразований получим

$$U_{c} = \frac{U}{CK_{1}K_{2}(K_{2} - K_{1})} \cdot \left[ K_{2} \left( \frac{K_{2}}{R_{1}} \gamma - \frac{B}{L} \right) e^{K_{1}t} - K_{2} \left( \frac{K_{2}}{R_{1}} \gamma - \frac{B}{L} \right) - K_{1} \left( \frac{K_{1}}{R_{1}} \gamma - \frac{B}{L} \right) e^{K_{2}t} + (11) + K_{1} \left( \frac{K_{1}}{R_{1}} \gamma - \frac{B}{L} \right) \right].$$

Для обеспечения высокого быстродействия ЭМ параметры цепи необходимо выбрать такими, чтобы можно было получить как можно большую скорость изменения тока и напряжения на ее элементах, что достигается только при колебательном переходном процессе. В этом случае корни характеристического уравнения комплексно-сопряженные [3].

$$K_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = -\delta \pm j\omega_0' = \omega_0 e^{\pm j \left(\frac{\pi}{2} + \beta\right)}, \quad (12)$$

где  $\omega_0^2$  – круговая частота собственных затухающих колебаний цепи;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;  $\beta = \arctan \frac{\delta}{\omega'_0}$  – коэффициент фазы.

Приняв во внимание (12) и следующие формулы  $K_2 - K_1 = -2j\omega'_0$ ;  $K_1K_2 = \omega_0^2$ ;  $\sin 2\beta = (R_1 + R_2)C\omega'_0$ ;  $\omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ;  $\omega_0^2 L = \frac{1}{C}$ ;  $e^{j\left(\omega'_0 - \frac{\pi}{2} - \beta\right)} - e^{-j\left(\omega'_0 - \frac{\pi}{2} - \beta\right)} =$  $= 2j\sin\left(\omega'_0 t - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$ ;  $B = 1 - \gamma \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ ,

ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2014. №5

выражения (10) и (11) для колебательного переходного процесса после соответствующих преобразований запишем в виде

$$i_{2} = \frac{Ue^{-\delta t}}{LR_{1}\omega'_{0}} \cdot \left\{ \gamma \sqrt{\frac{L}{C}} \sin\left(\omega'_{0}t + \frac{\pi}{2} - \beta\right) + \left[R_{1} - \gamma\left(R_{1} + R_{2}\right)\right] \sin \omega'_{0}t \right\},$$
(13)

$$U_{c} = \frac{U}{R_{1}\omega_{0}} \cdot \left\{ \frac{\gamma}{C} \left[ e^{-\delta t} \sin(\omega_{0}' t - 2\beta) + \sin 2\beta \right] - \left[ R_{1} - \gamma(R_{1} + R_{2}) \right] \cdot \left[ \frac{e^{-\delta t}}{\sqrt{LC}} \sin\left(\omega_{0}' t + \frac{\pi}{2} - \beta\right) - \omega_{0}' \right] \right\}.$$
(14)

Весьма важной является величина напряжения  $U_{\kappa_3}$  между коллектором и эмиттером VT при его запирании, то есть при переходе K из первого положения во второе. Согласно второму закону Кирхгофа с учетом (13) и (14) запишем

$$U_{\kappa9} = R_2 i_2 + U_c = \frac{R_2 U e^{-\delta t}}{R_1 L \omega'_0} \cdot \left\{ \gamma \sqrt{\frac{L}{C}} \sin\left(\omega'_0 t + \frac{\pi}{2} - -\beta\right) + \left[R_1 - \gamma (R_1 + R_2)\right] \cdot \sin \omega'_0 t \right\} + \frac{U}{R_1 \omega'_0} \cdot \left\{ \frac{\gamma}{C} \left[ e^{-\delta t} \sin(\omega'_0 t - 2\beta) + \sin 2\beta \right] - \left[R_1 - \gamma (R_1 + R_2)\right] \cdot \left[ \frac{e^{-\delta t}}{\sqrt{LC}} \sin\left(\omega'_0 t + \frac{\pi}{2} - \beta\right) - \omega'_0 \right] \right\}.$$
(15)

Из полученного соотношения следует, что с ростом  $\gamma$ , имеющей место при увеличении длительности импульса тока в ЭМ, равно как и при вырастании  $R_2$ , напряжение  $U_{\kappa_3}$  увеличивается. Снижение  $U_{\kappa_3}$  наблюдается при увеличении емкости C демпфирующего конденсатора. Однако эта емкость и  $R_2$  влияют на частоту собственных затухающих колебаний цепи

$$\omega_0' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_1 + R_2}{2L}\right)^2}$$

и с их ростом  $\omega_0'$  падает, вызывая увеличение соответствующих множителей в (15) и, тем самым, несколько ослабляя эффект ограничения  $U_{\kappa_3}$  демпфирующей цепочкой. С другой стороны, рост  $R_2$  сопровождается увеличением  $\delta$  и повышением скорости затухания переходного процесса. Отметим, что если тяговое усилие ЭМ значительно превышает затяжку его возвратной пружины, то с ростом *С* момент отпускания ЭМ может наступать с ощутимым запаздыванием вследствие возросшей продолжительности полуволны затухающего процесса и сдвига момента наступления равновесия механической и электромагнитной сил.

Вышеизложенное, а также конкретные значения  $U, L, R_1$  в реальной системе необходимо учитывать при выборе VT и параметров демпфирующей цепочки. В качестве VT выбирают транзистор типа КТ898А, КТ8232А2, а величины  $R_2$  и C лежат в пределах соответственно десятков Ом и единиц микро Фарад. Для нормальной работы выходного каскада (рис. 1) необходимо, чтобы переходной процесс в цепи окончился к моменту начала следующего импульса отбора пробы ОГ. Если считать, что переходной процесс практически полностью затухает за время

 $t \geq 3/\delta$ ,

то нетрудно показать, что в случае двухтактного ДВС должно выполняться соотношение

$$\frac{10}{L} \big( R_1 + R_2 \big) \ge n \,,$$

а в случае четырехтактного

$$\frac{20}{L} (R_1 + R_2) \ge n ,$$

где *n* – частота вращения коленчатого вала ДВС, выраженная в об/мин.

Следовательно, при выборе параметров демпфирующей цепочки необходимо учитывать еще и диапазон скоростных режимов ДВС.

#### выводы

Вышеприведенная методика позволяет получить максимальное быстродействие электромагнита при его включении за счет реализации колебательного переходного процесса и определить параметры демпфирующей цепочки, ограничивающей перенапряжение на транзисторе и, тем самым, повышающей надежность устройства. Благодаря высокому быстродействию повышается точность реализации моментов включения и отключения электромагнитного клапана, отбирающего пробы выпускных газов ДВС, и улучшается качество диагностирования двигателя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходасевич А.Г, Ходасевич Т.И. Справочник по устройству и ремонту электронных приборов автомобилей. – М: Антелком, 2004. – 244 с.

2. Тюнин Н.А., Родин А.В. Электроника в автомобиле. – М.: Солон-пресс, 2012. – 128 с.

3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. В 2-х т. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.

**REFERENCES:** *1.* Khodasevich A.G., Khodasevich T.I. *Spravochnik po ustroistvu i remontu elektronnykh priborov avtomobilei* [Reference book on the device and repair of electronic devices of cars]. Moscow, Antelcom Publ., 2004. 244 p. *2.* Tyunin N.A., Rodin A.V. *Elektronika v avtomobile* [Electronics in the car]. Moscow, Solon-press Publ., 2012. – 128 p. *3.* Neumann L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V 2-kh t.* [Theoretical bases of electrical engineering. In 2 vols.]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 536 p.

#### Поступила (received) 28.05.2014

Лавриненко Ольга Валериевна, преподаватель-стажер, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, тел/phone +38 057 7076961, e-mail: lavrinenko\_olya@mail.ru

### O.V. Lavrinenko

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

21, Frunze Str., Knarkiv, 61002, Ukraine

#### Research on transients and choice of optimum parameters of switching elements for an electromagnetic valve control for combustion engine exhaust sampling.

The article introduces a classical-method-based analysis procedure for transients in the control cascade of an electromagnetic valve for combustion engine exhaust sampling. Analytical expressions for currents and voltage on the cascade basic elements are obtained to allow specifying the optimal parameters of these elements in terms of speed and reliability.

*Key words* – combustion engine exhaust, electromagnetic valve, oscillatory transitional process.

В.С. Петрушин, Р.Н. Еноктаев

## ПРОЕКТНЫЕ ДИАПАЗОННЫЕ КРИТЕРИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Виконано автоматизоване оптимізаційне проектування регульованих асинхронних двигунів для різних проектних задач при двох діапазонних критеріях. Проектні задачі припускають розгляд як статичних, так і динамічних режимів. Визначено зміну варійованих параметрів двигунів залежно від обраного критерію та проектної задачі.

Выполнено автоматизированное оптимизационное проектирование регулированных асинхронных двигателей для различных проектных задач при двух диапазонных критериях. Проектные задачи предполагают рассмотрение как статических, так и динамических режимов. Определено изменение варьируемых параметров двигателей в зависимости от выбранного критерия и проектной задачи.

#### ВВЕДЕНИЕ

Поскольку использование серийных асинхронных двигателей (АД) в частотных электроприводах (ЭП) не оптимально по массогабаритным, стоимостным, энергетическим показателям для конкретного электропривода может выполняться проектирование специальных регулируемых асинхронных двигателей (РАД) с учетом их работы на соответствующие по величине и характеру нагрузки, а также определенного режима работы [1-3]. РАД проектируются не на одну номинальную точку работы, как проектируются АД общепромышленного назначения, а на работу в заданном диапазоне регулирования и при их разработке существенно возрастает объем расчетов [4].

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае при проектировании РАД в качестве проектных критериев могут использоваться масса, габариты, стоимость двигателя, среднедиапазонные приведенные затраты на изготовление и эксплуатацию (ПЗ), среднедиапазонные энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), либо может быть применен обобщенный критерий, учитывающий в качестве составляющих вышеперечисленные критерии. Можно также использовать аналогичные проектные критерии, определяемые для всего регулируемого ЭП. Результаты проектирования изменяются при различных используемых критериях или при различных их составляющих в обобщенном критерии, а также зависят от задаваемых коэффициентов значимости этих составляющих. При расчете критериев могут приниматься во внимание их значения в переходных режимах работы. Такой подход позволяет осуществлять проектирование как для режимов работы, в которых продолжительности переходных режимов значительно меньше продолжительностей работы в установившихся режимах, так и для режимов при соизмеримости вышеуказанных продолжительностей. Таким образом, можно определить несколько проектных задач, характеризуемых как диапазоном работы на определенную нагрузку, так и продолжительностью работы на заданных тахограммами частотах вращения.

Если в качестве критерия проектирования использовать такой энергетический показатель, как среднедиапазонный КПД двигателя, будет обеспечиваться проектирование энергосберегающего РАД.

Среднедиапазонные энергетические проектные критерии [5] должны отражать энергетику РАД во всем диапазоне регулирования от n1 до n2 и определяются как эквивалентные усредненные для этого диапазона. То же касается и обобщенного критерия приведенных затрат двигателя, который учитывает стоимость изготовления и затраты на эксплуатацию. В связи с тем, что затраты зависят от КПД и коэффициента мощности, обобщенный критерий приведенных затрат имеет различные значения в разных точках диапазона и целесообразно определять диапазонное значение этого критерия, т.е. эквивалентное усредненное для всего диапазона.

Если диапазонные энергетические показатели рассчитываются как усредненные для всего диапазона

$$\eta_{c\partial A\mathcal{I}} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \eta_{A\mathcal{I}}(n) \cdot dn, \qquad (1)$$

$$\cos\varphi_{1c\partial A\overline{\mu}} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \cos\varphi_{1A\overline{\mu}}(n) \cdot dn, \qquad (2)$$

то диапазонный критерий ежегодных приведенных затрат двигателя может быть определен исходя из следующего. При известной полной стоимости двигателя ced значение критерия определяется как

$$\Pi 3_{A\underline{\beta}} = (ced + C_u) \cdot [1 + T_{\mu}(k_a + k_o)] + C_{aA\underline{\beta}}, \quad (3)$$

где C<sub>u</sub> – стоимость затрат на компенсацию реактивной мощности, грн; Са – стоимость потерь электроэнергии за год, грн; Т<sub>н</sub> – нормативный срок окупаемости двигателя, лет;  $k_a$  – доля затрат на амортизационные отчисления; k<sub>o</sub> – доля затрат на обслуживание при эксплуатации двигателя.

Для регулируемых асинхронных двигателей значения  $T_{\mu} = 5$  лет,  $k_a = 0,065, k_o = 0,069$  принимаются теми же, что и для общепромышленных АД [2]. Тогда Γ

$$I3_{A\underline{\beta}} = 1,67(ced + C_u) + C_{aA\underline{\beta}},\tag{4}$$

$$C_u = C_{cre} P_1(tgj_1 - 0,484), \tag{5}$$

$$C_{aA\underline{\lambda}} = C_{cae} P_{1A\underline{\lambda}} (1,04 - h_{A\underline{\lambda}}), \tag{6}$$

где C<sub>cae</sub> - коэффициент, учитывающий стоимость потерь активной энергии, представляющий собой произведение стоимости 1 кВт.ч электроэнергии в течении срока службы двигателя (0,2 грн. за кВт-ч), числа часов работы двигателя в течении года (2100), числа лет работы до капитального ремонта (5) и коэффициента относительной загрузки двигателя (0,8),  $C_{cre}$  – коэффициент, учитывающий стоимость компенсации реактивной энергии и представляющий собой произведение стоимости 1 кВАр реактивной мощности компенсирующих устройств (10 грн. за 1 кВАр), коэффициента участия двигателя в максимуме нагрузки системы (0,25).

$$\Pi 3_{c\partial A\overline{A}} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \Pi 3_{A\overline{A}}(n) \cdot dn.$$
(7)

Следует отметить, что при работе РАД в составе современных частотно-регулируемых электроприводов из-за близости коэффициента мощности привода к 1 из выражения критерия ПЗ электропривода может быть исключена составляющая, соответствующая стоимости компенсации реактивной энергии

$$\Pi \mathcal{B}_{\mathcal{H}} = cep[1 + T_{\mu}(k_a + k_o)] + C_{a\mathcal{H}}, \qquad (8)$$

где *сер* – полная стоимость электропривода

$$C_{a\Im\Pi} = C_{cae} P_{1\Im\Pi} (1,04 - h_{\Im\Pi}), \qquad (9)$$

Значения коэффициентов и стоимостей, а так же часов и лет используются такие же, что и для определения  $\Pi 3_{AD}$ 

$$\Pi 3_{c\partial \Im \Pi} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \Pi 3_{\Im \Pi}(n) \, dn, \tag{10}$$

Если известны временные диаграммы эксплуатации нагрузок, т.е. время работы на каждой частоте вращения, определяемое технологическими требованиями к приводным механизмам, то оценку данных диапазонных энергетических критериев двигателя и привода необходимо производить с учетом длительности работы двигателя в каждой точке диапазона регулирования

$$\eta_{c\partial} = \frac{\sum_{i} (\eta(n_i) \cdot t_{ni})}{\sum_{i} t_{ni}},$$
(11)

$$\cos \varphi_{1c\partial} = \frac{\sum_{i} (\cos \varphi_{1c\partial}(n_i) \cdot t_{ni})}{\sum_{i} t_{ni}},$$
 (12)

где  $t_{ni}$  – время работы двигателя при частоте вращения  $n_i$ , i – порядковый номер участка тахограммы.

Соответственно рассчитываются среднедиапазонные приведенные затраты

$$\Pi 3_{c\partial} = \frac{\sum_{i} (\Pi 3(n_i) \cdot t_{ni})}{\sum_{i} t_{ni}}.$$
 (13)

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проектировании РАД в соответствии с принципами системного подхода необходимо совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и нагрузок [7, 8]. Поэтому основной особенностью при проектировании РАД является необходимость использования в системе расчетного проектирования комплексной математической модели всей системы ЭП, а не модели только двигателя, как это делается при проектировании общепромышленных АД [9]. Стандартные методы и программное обеспечение автоматизированного проектирования, разработанные для машин общепромышленного назначения, не могут быть применены для решения задач проектирования и оптимизации регулируемых двигателей. На кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета разработан программный продукт DIMASDrive [6], позволяющий осуществить проектирование РАД.

При разработке РАД целесообразно в качестве критериев использовать среднедиапазонный критерий КПД двигателя и среднедиапазонный критерий ПЗ электропривода.

Рассматривается работа серийного асинхронного двигателя 4A160S4. Используется схема соединения обмотки статора "звездой". Рассматривается работа двигателя в РЭП с частотным преобразователем (Altivar 58, 1500 у.е., 15 кг,  $\eta_{np} = 0,94$ ) при законе частотного управления U/f = const. В качестве нагрузки используется "лифтовая" нагрузка величиной 75 Н.м. Настройки преобразователя позволяют обеспечить выполнение каждой из трех рассматриваемых проектных задач. В качестве варьируемых параметров выбраны длина пакета статора двигателя (L) и частота, на которую проектируется обмотка статора (ОС) двигателя. Изменение частоты (f) предполагает автоматическое изменение числа витков ОС  $(W_1)$ , сечения эффективного проводника ОС  $(q_{ab})$ , диаметра обмоточного провода  $(d_{np})$ .

Первая проектная задача предполагает оптимизационное проектирование РАД для определенного диапазона регулирования. В рассматриваемом случае выбран диапазон 300 – 1900 об/мин. Диапазоны изменения варьируемых параметров от 0,8 до 1,2 базовых значений.

В табл. 1 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений при использовании двух выбранных критериев проектирования.

Таблица 1

Проектные критерии и конструктивные изменения

Двига- тели Показатели и параметры	Серийный	Оптимизиро- ванный по критерию η	Оптимизиро- ванный по критерию ПЗ <sub>ЭП</sub>
η <sub>c∂</sub> АД, %	83,43	85,54	85
<i>ПЗ<sub>сд</sub></i> АД, тыс. у.е.	2,143	2,114	2,101
Масса АД, кг	120	132	127
Стоимость АД, у.е.	651	710	683
Масса РЭП, кг	135	147	142
Стоим. РЭП, тыс. у.е.	2,151	2,210	2,183
<i>ПЗ<sub>сд</sub></i> РЭП, тыс. у.е.	4,709	4,678	4,664
η <sub>сд</sub> РЭП, %	81,8	83,86	83,34
<i>L</i> , мм	130	155	145
<i>f</i> , Гц	50	58,54	55,47
$W_1$	112	96	101
$q_{i\phi}$ , mm <sup>2</sup>	2,45	2,87	2,72
<i>d<sub>np</sub></i> , мм	1,33	1,43	1,38
Вторая проектная задача предполагает оптимизационное проектирование РАД для работы на заданную тахограмму (100 с. – 300 об/мин, 100 с. – 1900 об/мин) и решается без учета переходных процессов (рис. 1).



при второй проектной задаче

В табл. 2 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений при использовании двух выбранных критериев проектирования.

Проектные критерии и конструктивные изменения

Таблица 2

Двига- тели Показатели и параметры	Серийный	Оптимизиро- ванный по критерию η	Оптимизиро- ванный по критерию ПЗ <sub>ЭП</sub>
η <sub>c∂</sub> АД, %	75,13	80,5	80,15
<i>ПЗ<sub>сд</sub></i> АД, тыс. у.е.	2,603	2,349	2,304
Масса АД, кг	120	129	121
Стоимость АД, у.е.	651	696	654
Масса РЭП, кг	135	144	136
Стоим. РЭП, тыс. у.е.	2,151	2,196	2,154
<i>ПЗ<sub>сд</sub></i> РЭП, тыс. у.е.	5,169	4,915	4,864
<i>η<sub>с∂</sub></i> РЭП, %	73,66	78,92	78,58
<i>L</i> , мм	130	150	134
<i>f</i> , Гц	50	59,62	59,94
$W_1$	112	94	93
$q_{i\phi}, \mathrm{MM}^2$	2,45	2,92	2,94
<i>d<sub>np</sub></i> , мм	1,33	1,43	1,43

Третья проектная задача предполагает оптимизационное проектирование РАД для работы на заданную тахограмму (1 с. – 300 об/мин, 1 с. – 300 об/мин, 2 с. – 1900 об/мин, 2 с. – 300 об/мин) и решается с учетом переходных процессов (рис. 2).Первая секунда с отображением пуска на рис. 2 не представлена и в расчете энергетических показателей не учитывалась.

В табл. 3 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений при использовании двух выбранных критериев проектирования.

#### выводы

1. Результаты оптимизационного проектирования (значения конструктивных изменений) различны в зависимости от выбранного проектного критерия. 2. Экстремумы проектных критериев в зависимости от варьируемых параметров не совпадают.

3. Аналогичным образом можно осуществить оптимизационное проектирование при других критериях и проектных задачах, а также разнообразных варьируемых параметрах.

110000010000000								
Двига- тели Показатели и параметры	Серийный	Оптимизиро- ванный по критерию η	Оптимизиро- ванный по критерию ПЗ <sub>ЭП</sub>					
η <sub>c∂</sub> АД, %	76,65	80,4	77,78					
<i>ПЗ<sub>сд</sub></i> АД, тыс. у.е.	1,173	1,090	1,088					
Масса АД, кг	120	121	130					
Стоимость АД, у.е.	651	652	702					
Масса РЭП, кг	135	136	145					
Стоим. РЭП, тыс. у.е.	2,151	2,152	2,202					
<i>ПЗ<sub>сд</sub></i> РЭП, тыс. у.е.	3,678	3,594	3,593					
η <sub>сд</sub> РЭП, %	75,15	78,62	76,5					
<i>L</i> , мм	130	133	153					
<i>f</i> , Гц	50	59,94	59,51					
$W_1$	112	93	94					
$q_{i\phi}, \mathrm{MM}^2$	2,45	2,94	2,92					
<i>d<sub>np</sub></i> , мм	1,33	1,43	1,43					

Проектные критерии и конструктивные изменения

Таблица 3



линия) и КПД (сплошная линия) базового двигателя при третьей проектной задаче

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Проектирование модификаций асинхронных короткозамкнутых двигателей для систем полупроводникового электропривода // Проблемы автоматизированного привода. Вестник Харьковск. гос. политехн. ун-та. – 1999. – Вып. 61. – С. 196-197.

2. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2001. – Вип. 56. – С. 51-54.

3. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учебное пособие. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 303 с.

4. Петрушин В.С. Оптимизация обмоточных данных частотно-регулируемых асинхронных двигателей // Вісник НТУ "ХПІ". – 2002. – Вип. 12. – Том 1. – С. 242-245.

5. Петрушин В.С. Диапазонные критерии оптимальности при проектировании регулируемых асинхронных двигателей // Труды Одесск. политехн. ун-та. – 2001. – Вып.1(13). – С. 81-86.

6. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт "DIMASDrive". Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). – К.: Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

7. Schroder P. Elektrische Antriebe. Regelung von Antriebssystemen. Berlin: Springer, 2001, 1172 p.

8. Park T.S., Kim S.H, Yoo J.Y. Speed-sensorless vector control of an induction motor using recursive least square algorithm // Trans. KIEE. – 1999. – vol. 48B. – №3. – pp. 139-143.

9. GOST IEC/TS 60034-25 Ed. 1.0 Rotating electrical machines Part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply.

REFERENCES: 1. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Jakimec A.M. Design modifications asynchronous cage motors for electric semiconductor systems. Vestnik Khar'kovskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universiteta – Bulletin of Kharkov State Polytechnic University, 1999, no.61, pp. 196-197. 2. Petrushin V.S. These costs asynchronous motors in the drive frequency for different control laws. Elektpomashinobuduvannja ta elektroobladnanja: Resp. mizhvid. naukovo-tekhnichnii zbirnik Electrical machine-building and electrical equipment: Republican interdepartmental scientific-technical collection, 2001, no.56, pp. 51-54. 3. Petrushin V.S. Asinhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode: Uchebnoe posobie [Induction motors in adjustable electric: Textbook]. Odessa, Nauka i tehnika Publ., 2006. 320 p. 4. Petrushin V.S. Optimization of winding data of variable frequency induction motors. Visnyk NTU "KhPI" - Bulletin of NTU "KhPI", 2002, no.12, pp. 196-197. 5. Petrushin V.S. Range of optimality criteria for the design of controlled asynchronous motors. Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta -Proceedings of Odessa Polytechnic University, 2001, no.1(13), pp. 81-86. 6. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Jakimec A.M. Programmnyj produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovanija asinhronnyh korotkozamknutyh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprivoda [Program performance analysis, selection and design of asynchronous cage motors controlled drive systems]. Patent UA, no.4065. 7. Schroder P. Ekektrische Antribe. Regelung von Antriebssystemen [Electric Actuators. Control of Drive Systems]. Berlin, Springer Publ., 2001, 1172 p. 8. Park T.S., Kim S.H, Yoo J.Y. Speedsensorless vector control of an induction motor using recursive least square algorithm. Trans. KIEE, 1999, vol.48B, no.3, pp. 139-143. 9. GOST IEC/TS 60034-25 Ed. 1.0 Rotating electrical machines Part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply.

#### Поступила (received) 06.07.2014

Петрушин Виктор Сергеевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Еноктаев Ростислав Николаевич<sup>1</sup>, магистрант, <sup>1</sup> Одесский национальный политехнический университет, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, тел/phone +380 048 7058494, e-mail: victor\_petrushin@ukr.net, rostik-enok@inbox.ru

#### V.S. Petrushin<sup>1</sup>, R.N. Jenoktajev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Odessa National Polytechnic University

1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine

Design range criteria in designing of controlled asynchronous motors.

The paper presents automated optimization designing of regulated induction motors accomplished for a variety of design problems under two range criteria. Design tasks involve consideration of both static and dynamic modes. Dependence of change in the motors variable parameters on the criterion chosen and the designing objectives is determined.

*Key words* – controlled induction motor, design range criteria, automated optimization designing.

А.А. Ставинский, О.О. Пальчиков

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На основі методу відносних коефіцієнтів показників технічного рівня з відносними геометричними керованими змінними отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критеріями мінімумів маси та вартості активної частини асинхронних короткозамкнених двигунів та виконано порівняльний аналіз вказаних показників при традиційному та оберненому виконаннях статора і ротора.

На основе метода относительных коэффициентов показателей технического уровня с относительными геометрическими управляемыми переменными получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимума массы и стоимости активной части асинхронных короткозамкнутых двигателей и выполнен сравнительный анализ указанных показателей при традиционном и обращенном исполнениях статора и ротора.

Факторы снижения энергетических потерь и удельной материалоемкости неизменных на протяжении многих десятилетий "традиционных" структур электромагнитных систем (ЭМС) асинхронных двигателей (АД) усовершенствованием электротехнических материалов во второй половине XX века дополнены возможностями оптимизационного проектирования на основе прогресса вычислительной техники [1]. При этом сформировалось мнение [2-8], что в последней четверти прошедшего столетия из традиционных ЭМС и конструкции АД "выжато все". Согласно [3] развитие электромашиностроения в конце XX века "приостановлено". Однако прошедшие 30 лет ничего не изменили, целый ряд "новых" серий АД созданных в начале наступившего столетия практически не имеет преимуществ перед предшествующими разработками [7, 8]. Концептуально ЭМС современного общепромышленного АД не отличается от исходной структуры (рис. 1,а), разработанной М.О. Доливо-Добровольским. Его конструктивная часть, в частности оребренный корпус с аксиальным обдувом, соответствует схеме начала XX века и, согласно [3, 7], не является эффективной. Также развивались с расширением структурного и видового состава, специальные АД, в том числе отличающиеся внешним положением ротора (рис. 1,б) и аксиальным рабочим зазором (рис. 1,в) [6, 8-12]. Применение электрических машин специального назначения и исполнения взамен их аналогов единых серий создает возможности усовершенствования ряда механизмов, технических систем и комплексов [12-16].

В связи с возрастанием значимости использования специальных АД, в дополнение к определению соотношения главных размеров и элементов ЭМС



Рис. 1. Электромагнитные системы асинхронных короткозамкнутых двигателей

цилиндрического (рис. 1,а,б) и аксиального (рис. 1,в) исполнений [11, 13], возникает целесообразность решения задач оптимизационного сравнительного анализа их массостоимостных и энергетических показателей. Кроме того, возникает необходимость аналитической оценки результатов структурного преобразования ЭМС, например разделения (секционирования) магнитопроводов ротора и статора (рис. 1,в, рис. 2,а,б, рис. 3,а) с целью достижения специальных требований – улучшения виброакустических характеристик [10, 14], а также контрроторного вращения [15]. Другими примерами секционирования и преобразования структур ЭМС является замена традиционной плоской (рис. 1,а,б) или цилиндрической (рис. 1,в) конфигураций элементарных слоев магнитопровода соответственно на конусно-плоскостную (рис. 3,а,б) и конусноцилиндрическую (рис. 3,в,г) конфигурации [8-12].

При этом общими критериями структурной и параметрической оптимизации ЭМС АД отличающихся положением в пространстве и конфигурацией элементов, а также числом степеней свободы движения, могут служить определяющие основные массостоимостные и энергетические характеристики показатели технического уровня [17].



Рис. 2. Экспериментальные образцы специальных асинхронных двигателей – торцевого двухроторного (а) и обращенного с двухпакетным статором и ротором (б)

Цель работы – развитие метода оценки результатов структурных преобразований статических ЭМС [18] на основе целевых функций (ЦФ) с относительными коэффициентами-показателями и геометрическими относительными управляемыми переменными (УП), использованием указанного метода для анализа электромеханических преобразователей. Также составной частью работы является сравнение массостоимостных показателей ЭМС короткозамкнутых АД (рис. 1,а,б) цилиндрического исполнения (АДК) и с внешним ротором (АДВР).

При разработке электрической машины применяются различные методы оптимизации, использующие понятие машинной постоянной [1, 13].

Машинная постоянная  $C_A$  связывает диаметр активной поверхности D и активную длину  $l_{\delta}$  статора с расчетной (электромагнитной) мощностью P', частотой вращения магнитного поля  $\Omega_1$ , линейной нагрузкой статора A и амплитудой индукции в рабочем зазоре  $B_{\delta}$  электрической машины

$$C_A = D^2 l_{\delta} / P' = K_{CA} / (K_p K_v K_{c\kappa} \Omega_1 A B_{\delta}),$$

где  $K_{CA}$  – коэффициент, определяющийся принятой системой единиц и особенностями распределения магнитного поля в рабочем зазоре;  $K_p$ ,  $K_y$  и  $K_{c\kappa}$  – коэффициенты распределения, укорочения и скоса обмоток статора и ротора.



Рис. 3. Специальные конструкции: шестиполюсный обращенный асинхронный двигатель 0,6 кВт со снятым полуротором (а), пакеты и пластина магнитопровода полуротора (б), магнитопровод (в) и ротор (г) торцевого двухполюсного двигателя 1,5 кВт (380 В, 50 Гц)

Масса и стоимость ЭМС электрической машины снижаются, а потери возрастают с увеличением электромагнитных нагрузок A,  $B_{\delta}$  и плотности тока статора (ротора)  $J_{1(2)}$ , а также отношений  $K_{Bz}$  и  $K_{Ba}$  к индукции  $B_{\delta}$  соответственно амплитуд индукции зубца  $B_{z1(2)}$ и ярма  $B_{a1(2)}$  статора (ротора), которые соответствуют диапазонам [1]:

$$K_{Bz} = K_{Bz1} = B_{z1}/B_{\delta} \approx K_{Bz2} = B_{z2}/B_{\delta} = 2,0...3,0; \quad (1)$$
  

$$K_{Ba} = K_{Ba1} = B_{a1}/B_{\delta} \approx K_{Ba2} = B_{a2}/B_{\delta} = 1,0...2,0. \quad (2)$$

Принципу электромагнитной эквивалентности сравнения различных ЭМС соответствует равенство P' и идентичности соответственно электромагнитных нагрузок, коэффициентов  $K_{Bz}$  (1) и  $K_{Ba}$  (2), а также полного коэффициента заполнения паза статора  $K_{3\pi}$  и коэффициента заполнения магнитопровода электротехнической сталью (ЭТС)  $K_{3c}$  [1] сравниваемых электрических машин [11, 13]. На массостоимостные и энергетические характеристики объектов сравнения, подобных конструкциям (рис. 1-3), при идентичных электромагнитных нагрузках и способах охлаждения существенное влияние оказывают специфические особенности структуры и геометрии элементов ЭМС [11].

В целом задачу оптимизации АД можно сформулировать как поиск экстремума ЦФ  $F_{\rm u}$ , которая соот-

ветствует заданному критерию оптимизации

$$F_{\rm II} = f(\Sigma И \Pi + \Sigma \Pi O + \Sigma Y \Pi), \tag{3}$$

где ΣИД – исходные данные технического задания и константы проектирования; ΣПО – проектные ограничения, определяемые требованиями технического задания; ΣУП – совокупность УП.

В общем случае ΣИД включает величины номинальных мощности Р<sub>н</sub>, фазного напряжения U<sub>1</sub> и частоты  $f_1$ ; числа фаз  $m_1$ , пар полюсов p и пазов на полюс и фазу  $q_1$ ; числа параллельных ветвей  $a_1$  и определяющий обмоточный коэффициент тип обмотки статора. Величины и показатели ΣΠО соответствуют требованиям технического задания и состоят из основных проектных ограничений – превышения температуры обмотки, кратностей моментов и пускового тока, а также специальных ограничений, например уровней шума и вибрации. В состав ΣУП обычно входят величины и параметры главных размеров и электромагнитные нагрузки [1]. В связи с большим числом слагаемых (3), задача оптимизации АД является весьма сложной, а УП в виде  $A, B_{\delta}$  и  $J_{1(2)}$  зависят от мощности, частоты вращения, назначения, способа охлаждения АД и проектных ограничений и изменяются в относительно широких пределах. Поэтому

сравнительный анализ вариантов АД с "классическим" и нетрадиционным выполнением элементов активной части (рис. 1-3) может быть выполнен на основе сопоставления ЦФ структурной оптимизации ЭМС. Подобные ЦФ должны соответствовать основным показателям технического уровня [17] и удовлетворять условию универсальности, то есть приемлемости и идентичности их общего вида и УП для сравниваемых вариантов ЭМС. Кроме того, для исключения зависимости от мощности и способа охлаждения, основные показатели и УП должны быть представлены в относительных единицах.

Изложенным условиям электромагнитной эквивалентности и универсальности соответствует метод оптимизации [18], согласно которому любая структура ЭМС может быть представлена совокупностью полных целевых функций  $F_{u,i}$ 

$$F_{\mathrm{II}\,i} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\mathrm{H}\mathrm{I}\mathrm{I}}}\right)^3 \mathrm{K}_i \Pi_{ia}^*, \qquad (4)$$

где П<sub>ИД</sub> – показатель исходных данных (технического задания) проектирования; К<sub>i</sub> и П<sup>\*</sup><sub>ia</sub> – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов и относительный коэффициент-показатель массы (*i* = 1), стоимости (*i* = 2) и потерь активной мощности (*i* = 3) ЭМС, являющийся функцией относительных геометрических УП.

Сравнительный анализ различных вариантов ЭМС выполняется на основе определения и сопоставления  $\Pi^*_{ia}$  при идентичных  $\Pi_{UД}$  содержащих, в соответствии с понятием  $C_A$ , составляющую P'связанную с  $P_{\rm H}$  выражением

$$P' = K_E P_H /(\eta \cos \phi),$$

где  $K_E$  – соотношение ЭДС фазы статора и  $U_1$ ;  $\eta$  и соs $\phi$  – значения коэффициента полезного действия и энергетического коэффициента АД.

Для определения ЦФ (4) используются известные выражения числа эффективных проводников паза статора  $U_{\rm n}$ , чисел витков фазы и зубцов статора  $w_1$  и  $z_1$ , а также магнитного потока рабочего зазора  $\Phi_{\delta}$  [1]:

$$U_{\pi} = w_1 a_1 / (pq_1);$$
 (5)

$$w_1 = K_E U_1 / (4,44 K_p K_y f_1 \Phi_\delta);$$
 (6)

$$z_1 = 2pm_1q_1;$$
 (7)

 $\Phi_{\delta} = \lambda_{\delta} D^2 B_{\delta} / p,$  (8) где  $\lambda_{\delta}$  – первая геометрическая относительная УП оптимизации электрической машины, связывающая  $l_{\delta}$  и D.

Указанная УП в рассматриваемой задаче соответственно определяется длиной  $l_{\delta K(B)}$  и диаметром  $D_{K(B)}$  активной поверхности статора АДК (АДВР)

$$\lambda_{\delta K(B)} = l_{\delta K(B)} / D_{K(B)}.$$
(9)

Уравнения функций  $F_{\mu l(2)}$  массы (стоимости) электромагнитно-эквивалентных ЭМС различных АД составляются на основе определения суммарной площади пазов в поперечном слое магнитопровода статора

$$S_{1\Sigma} = z_1 U_{\rm n} S_{\rm sp} / K_{\rm sn}, \tag{10}$$

где  $S_{3\phi}$  – площадь сечения эффективного проводника обмотки статора,

$$S_{\mathrm{p}\phi} = P_{\mathrm{H}} / (a_1 m_1 J_1 U_1 \eta \cos \varphi). \tag{11}$$

Подстановка (5) – (9) и (11) преобразует (10) к виду, соответствующему АДК (АДВР)

$$S_{1\Sigma K(B)} = \Pi_{H \not \Box} / (K_{3\Pi} \lambda_{\delta K(B)} D_{K(B)}^2), \qquad (12)$$

где П<sub>ид</sub> рассматриваемых электромагнитноэквивалентных АД определяются выражением и геометрической размерностью:

$$\Pi_{\boldsymbol{H}\boldsymbol{\Lambda}} = K_{\rm E} p P_{\rm H} / (2,22 K_{\rm p} K_{\rm y} f_{\rm l} J_{\rm l} B_{\delta} \eta \cos \varphi);$$
  
$$[\Pi_{\boldsymbol{H}\boldsymbol{\Lambda}}] = [K_{3\Pi} \lambda_{\delta K({\rm B})} D_{K({\rm B})}^2 S_{\rm l\Sigma K({\rm B})}] = [M^4].$$
(13)

На основании (13) и идентичности П<sub>ид</sub> для сравниваемых АДК и АДВР вводится вторая геометрическая относительная УП оптимизации ЭМС АД

$$a_{\rm MK(B)} = D_{\rm K(B)}^4 / \Pi_{\rm HJ}$$
 (14)

В ЭМС АД малой и средней мощности, а также в рассматриваемых АДК и АДВР используются пазы формы, которая образована зубцами статора (ротора) с параллельными стенками и высотой  $h_{z1(2)K}$  и  $h_{z1(2)B}$  (рис. 4). Наиболее распространенные трапецеидальные и грушевидные пазы подобной формы [1] заменяются, при сохранении ширины и высоты зубцов, эквивалентными по площади и близкими по конфигурации расчетными пазами трапецеидальной формы с расчетной высотой шлица  $h_{p1(2)K}$  и  $h_{p1(2)B}$  статора (ротора) (рис. 4) соответственно АДК и АДВР [19].

Соответствующая (12) суммарная площадь размещения проводников фаз с изоляцией в поперечном слое статора АДК (АДВР) (рис. 4) определяется выражением

 $S_{1\Sigma K(B)} = [(b_{11\Sigma K(B)} + b_{12\Sigma K(B)})/2](h_{z1K(B)} - h_{p1K(B)}),$  (15) где  $b_{11\Sigma K(B)}$  и  $b_{12\Sigma K(B)}$  – суммы размеров  $b_{11K(B)}$  и  $b_{12K(B)}$ оснований трапеций расчетных пазов в поперечном слое магнитопровода статора АДК (АДВР) (рис. 4):

$$b_{11\Sigma K} = z_1 b_{11K} = \pi (D_K + 2h_{z1K}) - \pi D_K / (K_{3c} K_{Bz}); \quad (16)$$
  

$$b_{12\Sigma K} = z_1 b_{12K} = \pi (D_K + 2h_{p1K}) - \pi D_K / (K_{3c} K_{Bz}); \quad (17)$$
  

$$b_{11\Sigma B} = z_1 b_{11B} = \pi (D_B - 2h_{z1B}) - \pi D_B / (K_{3c} K_{Bz}); \quad (18)$$
  

$$b_{12\Sigma B} = z_1 b_{12B} = \pi (D_B - 2h_{p1B}) - \pi D_B / (K_{3c} K_{Bz}). \quad (19)$$

На основании равенства левых частей (12) и (15) и после подстановки (16), (17) и (18), (19) определяются, аналогично [19], квадратные уравнения расчета высоты зубца статора АДК (АДВР):

$$h_{z1K}^{2} - \alpha_{1} D_{K} h_{z1K} - \alpha_{2} \Pi_{H \downarrow} / (K_{3\pi} \lambda_{\delta K} D_{K}^{2}) = 0; \quad (20)$$

$$h_{z1B}^{2} + \alpha_{1} D_{B} h_{z1B} + \alpha_{2} \Pi_{HII} / (K_{3\Pi} \lambda_{\delta B} D_{B}^{2}) = 0, \quad (21)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – сомножители:

$$\alpha_1 = [1/(K_{3c}K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{put});$$
(22)

$$\alpha_2 = 1/[\pi(1 - K_{\text{pui}}^2)].$$
(23)

Входящий в (22), (23) коэффициент К<sub>рш</sub> исходя из реальных конфигураций зубцово-пазовых структур АД [1] определяется соотношением

 $K_{\text{рш}} = h_{\text{p1(2)K}} / h_{z1(2)K} = h_{\text{p1(2)B}} / h_{z1(2)B} = 0,04...0,12.$  (24) Решения уравнений (20) и (21) относительно  $h_{z1K(B)}$  имеют вид:

$$h_{z1K} = \sqrt[4]{\Pi_{\rm H}\Pi a_{\rm MK}} f_{\rm K1}({\rm K}_{3\Pi}, \lambda_{\delta \rm K}, a_{\rm MK});$$
 (25)

$$h_{z1B} = \sqrt[4]{\Pi_{\rm H}\Pi} a_{\rm MB} f_{\rm B1}(K_{3\Pi}, \lambda_{\delta \rm B}, a_{\rm MB}),$$
 (26)

где  $f_{K1}(K_{3\Pi}, \lambda_{\delta K}, a_{MK})$  и  $f_{B1}(K_{3\Pi}, \lambda_{\delta B}, a_{MB})$  – функциональные сомножители упрощения записи:

$$f_{\rm K1}({\rm K}_{\rm 3II},\lambda_{\rm \delta K},a_{\rm MK}) = 0.5\alpha_1 + \sqrt{0.25\alpha_1^2 + \alpha_2/({\rm K}_{\rm 3II}\lambda_{\rm \delta K}a_{\rm MK})};$$

$$f_{\rm B1}({\rm K}_{\rm 3\pi}\lambda_{\delta{\rm B}},a_{\rm MB}) = -0.5\alpha_1 - \sqrt{0.25\alpha_1^2 - \alpha_2}/({\rm K}_{\rm 3\pi}\lambda_{\delta{\rm B}}a_{\rm MB}) \ .$$



Рис. 4. Конфигурации и геометрические параметры зубцово-пазовых структур асинхронных двигателей классического исполнения (а) и с внешним ротором (б)

Суммарная площадь пазов в поперечном сечении магнитопровода короткозамкнутого ротора АДК (АДВР) определяется, с использованием (6), (8), (13) и на основе [1]

$$S_{2\Sigma K(B)} = z_2 I_2 / J_2 = I_{1H}(0, 2 + 0.8 \cos \varphi) 2m_1 w_1 K_p K_y / K_{cK} =$$
  
=  $\gamma_1 \Pi_{HZ} / (\lambda_{\delta K(B)} D_{K(B)}^2),$  (27)

где  $\gamma_1$  – расчетное соотношение, принимающее для реальных К<sub>р</sub>, К<sub>у</sub>, соs $\phi$ , К<sub>ск</sub>,  $J_{1(2)}$  значения

 $\gamma_1 = K_p K_y (0, 2 + 0.8 \cos \varphi) J_1 / (K_{c\kappa} J_2) = 1.338...2,785.$  (28)

Соответствующая (28) суммарная площадь пазов в поперечном сечении магнитопровода ротора АДК (АДВР) (рис. 4)

$$S_{2\Sigma K(B)} = [(b_{21\Sigma K(B)} + b_{22\Sigma K(B)})/2](h_{z2K(B)} - h_{pK(B)}), (29)$$
  
где  $b_{21\Sigma K(B)}$  и  $b_{22\Sigma K(B)}$  – суммы размеров  $b_{21K(B)}$  и  $b_{22K(B)}$ 

оснований трапеций расчетных пазов в поперечном сечении магнитопровода ротора диаметра  $D_{RK(B)}$  (рис. 4):

$$b_{21\Sigma K} = z_2 b_{21K} = \pi (D_{RK} - 2h_{Z2K}) - \pi D_{RK} / (K_{3c} K_{Bz}); \quad (30)$$
  

$$b_{22\Sigma K} = z_2 b_{22K} = \pi (D_{RK} - 2h_{p2K}) - \pi D_{RK} / (K_{3c} K_{Bz}); \quad (31)$$
  

$$b_{22\Sigma K} = z_1 b_{22K} - \pi (D_{RK} - 2h_{p2K}) - \pi D_{RK} / (K_{3c} K_{Bz}); \quad (32)$$

$$y_{21\Sigma B} - z_2 y_{21B} - n(D_{RB} + 2h_{22B}) - nD_{RB}/(\mathbf{K}_{3c} \mathbf{K}_{Bz}), \quad (32)$$

$$U_{22\Sigma B} = Z_2 U_{22B} = n(D_{RB} + 2n_{p2B}) - nD_{RB}/(R_{3c}R_{Bz}).$$
 (33)  
На основании паренства перых настей (27) и (29)

На основании равенства левых частей (27) и (29) и подстановки (30) – (33) определяются, аналогично [19], квадратные уравнения расчета высоты зубца ротора АДК (АДВР):

$$h_{z2K}^{2} + K_{D}\alpha_{1}D_{K}h_{z2K} + \alpha_{2}\gamma_{1}\Pi_{HII}/(\lambda_{\delta K}D_{K}^{2}) = 0 ; \quad (34)$$

$$h_{z2B}^{2} - (1/K_{D})\alpha_{1}D_{B}h_{z2B} - \alpha_{2}\gamma_{1}\Pi_{HI}/(\lambda_{\delta B}D_{B}^{2}) = 0, \quad (35)$$

где К<sub>D</sub> – коэффициент реальных соотношений [1] диаметров активных поверхностей статора и ротора

 $K_D = D_{RK} / D_K \approx D_B / D_{RB} = 0.985...0,995.$  (36) Решения уравнений (34), (35) относительно  $h_{z2K(B)}$ :

$$h_{z2\mathrm{K}} = \sqrt[4]{\Pi_{\mathrm{H}\mathrm{J}} a_{\mathrm{M}\mathrm{K}}} f_{\mathrm{K}2}(\lambda_{\delta\mathrm{K}}, a_{\mathrm{M}\mathrm{K}}); \qquad (37)$$

$$h_{z2B} = 4 \sqrt{\Pi_{\rm HZ} a_{\rm MB}} f_{\rm B2}(\lambda_{\delta \rm B}, a_{\rm MB}), \qquad (38)$$

где  $f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{MK})$  и  $f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{MB})$  – функциональные сомножители упрощения записи:

$$f_{\rm K2}(\lambda_{\rm \delta K}, a_{\rm MK}) = -0.5 K_D \alpha_1 - \sqrt{0.25 K_D^2 \alpha_1^2 - \alpha_2 \gamma_1 / (\lambda_{\rm \delta K} a_{\rm MK})}$$

 $f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{MB}) = (0.5\alpha_1 / K_D) + \sqrt{(0.25\alpha_1^2 / K_D^2) + \alpha_2 \gamma_1 / (\lambda_{\delta B} a_{MB})}$ . Высота ярма статора (ротора) АДК (АДВР) определяется на основе [1] и (2), (8) и (9), (14)

 $h_{a1(2)K(B)} = \Phi_{\delta} / (2K_{3c}B_{a1(2)}I_{\delta K(B)}) = \alpha_3 \sqrt[4]{\Pi_{H \square} a_{M K(B)}} / p$ ,(39) где  $\alpha_3 -$ коэффициент,

 $\alpha_3$ 

$$=1/(2K_{3c}K_{Ba}).$$
 (40)

Средняя длина витка обмотки статора АДК (АДВР) определяется, в соответствии с [1], а также на основе (9) и (25), (26):

$$\begin{split} l_{w1K} &= 2l_{\delta K} + \beta \pi (1,16+0,14\,p) (D_{K} + h_{z1K}) / p = \sqrt[4]{\Pi}_{H \Pi} a_{MK} \times (41) \\ &\times \{ 2\lambda_{\delta K} + \beta \pi (1,16+0,14\,p) [1 + f_{K1} (K_{3\Pi}, \lambda_{\delta K}, a_{MK})] / p \}; \end{split}$$

$$\begin{split} l_{w1B} &= 2l_{\delta B} + \beta \pi (1,16+0,14\,p) (D_{B} - h_{z1B}) / p = \sqrt[4]{\Pi_{H,I} a_{MB}} \times (42) \\ &\times \{ 2\lambda_{\delta B} + \beta \pi (1,16+0,14\,p) [1 - f_{B1} (K_{3\Pi}, \lambda_{\delta K}, a_{MK})] / p \}, \end{split}$$

где β – относительный шаг обмотки статора.

Масса меди обмотки статора АДК (АДВР) определяется с использованием (9), (12) и (41), (42)

 $m_{w1K(B)} = \rho_{M} l_{w1K(B)} S_{1K(B)} / 2 = \rho_{M} (\sqrt[4]{\Pi_{M}})^{3} \Pi_{w1K(B)}^{*}$ , (43) где  $\rho_{M}$  – плотность меди обмотки статора;  $\Pi_{w1K(B)}^{*}$  – по-казатель массы активного материала обмотки статора:

$$\Pi_{w1K}^{*} = \{\lambda_{\delta K} + \beta \pi (1,16+0,14p) [1 + f_{K1}(K_{3\Pi},\lambda_{\delta K},a_{MK})] / (2p) \} / (44) / (\lambda_{\delta K} \sqrt[4]{a_{MK}}),$$

$$\Pi_{w1B}^{*} = \left\{ \lambda_{\delta B} + \beta \pi (1,16+0,14p) [1 - f_{B1}(K_{3\pi},\lambda_{\delta B},a_{MB})] / (2p) \right\} / (45) / (\lambda_{\delta B} \sqrt[4]{a_{MB}})$$

Диаметр  $D_{3K(B)}$  и величина поперечного сечения  $S_{3K(B)}$  короткозамыкающего кольца ротора АДК (АДВР) определяются в соответствии с [1] и на основе (27), (36) и (37), (38):

$$D_{3K} = D_{RK} - 1, 2h_{22K} = 4 \sqrt{\Pi_{HII} a_{MK}} [K_D - 1, 2f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{MK})]; (46)$$

$$D_{3B} = D_{RB} + 1, 2h_{22B} = 4 \sqrt{\Pi_{HII} a_{MB}} [1, 2f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{MB}) + 1/K_D]; (47)$$

$$S_{3K(B)} = I_{3K(B)} / J_{3K(B)} = \gamma_1 \left( 4 \sqrt{\Pi_{HII}} \right)^2 / (48)$$

$$/ \left( \gamma_2 \pi 2 p \lambda_{\delta K (B)} \left( 4 \sqrt{a_{MK (B)}} \right)^2 \right), \qquad (48)$$

где  $I_{3K(B)}$  и  $J_{3K(B)}$  – ток и плотность тока короткозамыкающего кольца;  $\gamma_2$  – коэффициент, учитывающий уменьшение плотности тока в короткозамыкающем кольце,

$$\gamma_2 = 0, 8...0, 85. \tag{49}$$

Масса роторной обмотки АДК (АДВР) представляется на основе (9), (27) и (46) – (48) уравнением

$$m_{w2K(B)} = \rho_{a} \left( l_{\delta K(B)} S_{2\Sigma K(B)} + 2\pi D_{3K(B)} S_{3K(B)} \right) = \rho_{a} \left( \sqrt[4]{\Pi_{HI}} \right)^{3} \Pi_{w2K(B)}^{*},$$
(50)

где  $\rho_a$  и  $\Pi^*_{w2K(B)}$  – плотность и показатель массы материала короткозамкнутой обмотки:

$$\Pi_{w2K}^{*} = (\gamma_{1} + (\gamma_{1} / (\gamma_{2} p \lambda_{\delta K})) [K_{D} - 1, 2 f_{K2} (\lambda_{\delta K}, a_{MK})]) / (51) / (4\sqrt{a_{MK}}),$$

$$\Pi^*_{W2B} = \left(\gamma_1 + \left(\gamma_1 / (\gamma_2 p \lambda_{\delta B})) [1, 2f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{MB}) + 1 / K_D] \right) / (52) / \left(\frac{4}{\sqrt{a_{MB}}}\right)$$

Площади поперечных сечений магнитопроводов статора  $S_{M1K(B)}$  и ротора  $S_{M2K(B)}$  АДК (АДВР) при подстановке (14), (25), (26), (35), (37) и (38) – (40) представляются уравнениями:

$$\begin{split} S_{\rm M1K} &= 0.25\pi \left( D_{\rm K} + 2h_{z1\rm K} + 2h_{a1\rm K} \right)^2 - 0.25\pi D_{\rm K}^2 - S_{\rm 1\Sigma\rm K} = \\ &= \left( \sqrt[4]{a_{\rm MK}} \right)^2 \left( \sqrt[4]{\Pi_{\rm HI}} \right)^2 \left\{ \pi [f_{\rm K1}({\rm K}_{\rm 3II}, \lambda_{\delta\rm K}, a_{\rm MK}) + (\alpha_3 / p)] [1 + (53) + f_{\rm K1}({\rm K}_{\rm 3II}, \lambda_{\delta\rm K}, a_{\rm MK}) + (\alpha_3 / p)] - 1/({\rm K}_{\rm 3II}\lambda_{\delta\rm K}a_{\rm MK}) \}; \\ S_{\rm M1B} &= 0.25\pi \left( D_{\rm B} - 2h_{z1\rm B} - 2h_{a1\rm B} \right)^2 - 0.25\pi D_{\rm B}^2 - S_{\rm 1\Sigma\rm B} = \\ &= \left( \sqrt[4]{a_{\rm MB}} \right)^2 \left( \sqrt[4]{\Pi_{\rm HI}} \right)^2 \left\{ \pi [f_{\rm B1}({\rm K}_{\rm 3II}, \lambda_{\delta\rm B}, a_{\rm MB}) + (\alpha_3 / p)] [-1 + (54) + f_{\rm B1}({\rm K}_{\rm 3II}, \lambda_{\delta\rm B}, a_{\rm MB}) + (\alpha_3 / p)] - 1/({\rm K}_{\rm 3II}\lambda_{\delta\rm K}a_{\rm MK}) \}; \\ S_{\rm M2K} &= 0.25\pi \left( D_{R\rm K} - 2h_{z2\rm K} - 2h_{a2\rm K} \right)^2 - 0.25\pi D_{R\rm K}^2 - S_{2\Sigma\rm K} = \\ &= \left( \sqrt{-2} \right)^2 \right)^2 \left( \sqrt{-2} \right$$

$$= \left( \sqrt[4]{a_{\rm MK}} \right)^2 \left( \sqrt[4]{\Pi_{\rm HI}} \right)^2 \{ \pi [f_{\rm K2}(K_{\rm 3n}, \lambda_{\delta \rm K}, a_{\rm MK}) + (\alpha_3 / p)] [-K_{\rm D} + (55) + f_{\rm K2}(K_{\rm 3n}, \lambda_{\delta \rm K}, a_{\rm MK}) + (\alpha_3 / p)] - \gamma_1 / (\lambda_{\delta \rm K} a_{\rm MK}) \};$$

$$S_{M2B} = 0.25\pi (D_{RB} - 2h_{22B} - 2h_{a2B})^2 - 0.25\pi D_{RB}^2 - S_{2\Sigma B} = = (4\sqrt[4]{a_{MB}})^2 (4\sqrt[4]{\Pi_{HI}})^2 \{\pi [f_{B2}(K_{3n}, \lambda_{\delta B}, a_{MB}) + (\alpha_3 / p)] [1/K_D + (56)] \}$$

+ 
$$f_{\text{B2}}(K_{3\Pi}, \lambda_{\delta \text{B}}, a_{\text{MB}}) + (\alpha_3 / p)] - \gamma_1 / (\lambda_{\delta \text{K}} a_{\text{MK}}) \}.$$

Масса магнитопровода АДК (АДВР) определяется исходя из (9) и (53) – (56)

$$m_{\rm MMK(B)} = \rho_{\rm c} K_{3c} l_{\delta \rm K(B)} (S_{\rm M1K(B)} + S_{\rm M2K(B)}) = = \rho_{\rm c} \left( \sqrt[4]{\Pi_{\rm HI}} \right)^{\beta} \Pi^{*}_{\rm MMK(B)},$$
(57)

где  $\rho_c$  и  $\Pi^*_{MMK(B)}$  – плотность ЭТС и показатель массы магнитопровода АДК (АДВР):

$$\Pi_{MMK}^{*} = K_{3c} \left( \sqrt[4]{a_{MK}} \right)^{b} \left\{ \pi \lambda_{\delta K} [f_{K1}(K_{3\pi}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + (\alpha_{3} / p)] \times \left[ 1 + f_{K1}(K_{3\pi}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + (\alpha_{3} / p)] + (58) \right] + \pi \lambda_{\delta K} [f_{K2}(K_{3\pi}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + (\alpha_{3} / p)] [-K_{D} + f_{K2}(K_{3\pi}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + (\alpha_{3} / p)] - 1/(K_{3\pi}a_{MK}) - \gamma_{1} / a_{MK} ];$$

$$\Pi_{\text{MMB}}^{*} = K_{3c} \left[ \sqrt[4]{a_{\text{MB}}} \right]^{s} \{ \pi \lambda_{\delta \text{B}} [f_{\text{B1}}(K_{3\pi}, \lambda_{\delta \text{B}}, a_{\text{MB}}) + (\alpha_{3} / p)] \times \\ \times [-1 + f_{\text{B1}}(K_{3\pi}, \lambda_{\delta \text{B}}, a_{\text{MB}}) + (\alpha_{3} / p)] + (59) \\ + \pi \lambda_{\delta \text{B}} [f_{\text{B2}}(K_{3\pi}, \lambda_{\delta \text{B}}, a_{\text{MB}}) + (\alpha_{3} / p)] [1/K_{\text{D}} + \\ + f_{\text{B2}}(K_{3\pi}, \lambda_{\delta \text{B}}, a_{\text{MB}}) + (\alpha_{3} / p)] - 1/(K_{3\pi}a_{\text{MB}}) - \gamma_{1} / a_{\text{MB}} \}.$$

Масса  $M_{AK(B)}$  и зависящая от удельных цен меди С<sub>м</sub>, алюминия C<sub>a</sub> и ЭТС C<sub>c</sub> стоимость C<sub>AK(B)</sub> активных материалов АДК (АДВР) определяются на основе (43) – (45), (50) – (52) и (57) – (59) уравнениями вида (4):

$$M_{AK(B)} = m_{w1K(B)} + m_{w2K(B)} + m_{MMK(B)} = \rho_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{HII}} \right)^3 \Pi^*_{MK(B)}; (60)$$

 $C_{AK(B)} = C_{wIK(B)} + C_{w2K(B)} + C_{MMK(B)} = C_c \rho_c (\sqrt[4]{\Pi_{H_d}})^3 \Pi^*_{CK(B)}, (61)$ где  $\Pi^*_{MK(B)}$  и  $\Pi^*_{CK(B)}$  показатели массы и стоимости, позволяющие определять наличие оптимальных геометрических соотношений ЭМС АДК (АДВР), характеризующихся экстремальными значениями УП  $a_{MK(B)}$  и  $\lambda_{MK(B)}$ :

$$\Pi_{MK(B)}^{*} = \rho_{M} \Pi_{w1K(B)}^{*} / \rho_{c} + \rho_{a} \Pi_{w2K(B)}^{*} / \rho_{c} + \Pi_{MMK(B)}^{*}; (62)$$
  
$$\Pi_{CK(B)}^{*} = C_{M} \rho_{M} \Pi_{w1K(B)}^{*} / (C_{c} \rho_{c}) + C_{a} \rho_{a} \Pi_{w2K(B)}^{*} / (C_{c} \rho_{c}) + (63)$$
  
$$+ \Pi_{MMK(B)}^{*}.$$

В целом можно заключить, что уравнения (62) и (63) представляют возможность сравнительного анализа АДК и АДВР по относительным коэффициентам показателей массы и стоимости ЭМС. Использованием полных ЦФ (60) и (61) может быть выполнена поэтапная параметрическая оптимизация массостоимостных показателей рассматриваемых вариантов АД при заданных проектных ограничениях. Также уравнения вида (60) и (61) с компонентами (62) и (63) могут использоваться как составляющие ЦФ оптимизации АД по обобщенному критерию. Примеры результатов расчетов функциональных зависимостей (62) и (63) полученных при  $\rho_{\rm M}/\rho_{\rm c} = 8,9/7,65; \ \rho_{\rm a}/\rho_{\rm c} = 2,7/7,65; \ C_{\rm M}/C_{\rm c} =$ = 90,25/13,5; C<sub>a</sub>/C<sub>c</sub> = 47/13,5, а также минимальных, средних и максимальных значениях коэффициентов  $\gamma_1(1,338; 1,903; 2,785), \gamma_2(0,8; 0,825; 0,85), K_{Bz}(2; 2,5; 3),$ К<sub>*Ba*</sub>(1,6; 1,8; 2 при *p* = 1 и 1; 1,225; 1,45 при *p* = 3), К<sub>рш</sub> (0,04; 0,08; 0,12), К<sub>D</sub> (0,985; 0,99; 0,995) для АДК и АДВР с 2p = 2 и 2p = 6, приведены в табл. 1-2. Графики зависимостей (62), (63), соответствующих средним значениям расчетных коэффициентов АД указанной полюсности, представлены на рис. 5 и 6.

На основе выполненных оптимизационных расчетов установлена целесообразность и подтверждено предположение [19] разработки АДВР исходя из условий минимизации диаметра активной поверхности статора с целью улучшения массостоимостных показателей ЭМС. С учетом известных, в том числе из [10], конструктивных особенностей АДВР, заключающихся в меньших относительно АДК числе элементов, массы, металлоемкости и стоимости конструктивной части (рис. 3,а), представляется эффективной замена АДК на АДВР в приводах, допускающих передачу вращающего момента механизму непосредственно с внешнего ротора. Также целесообразна разработка, на основе ЦФ (1) и полученных в настоящей работе выражений и уравнений, математических моделей сравнительного анализа потерь активной мощности электромагнитноэквивалентных АДК и АДВР.

Таблица 1

Показатели массы и стоимости активной части вариантов асинхронных короткозамкнутых двухполюсных двигателей с внутренним и внешним ротором

				11		1			1 1				
γ <sub>1</sub> , α	o.e.	<i>а</i> <sub>МК</sub> , о.е.	λ <sub>δKЭ</sub> , o.e.	П <sup>*</sup> <sub>MK</sub> , o.e.	<i>a</i> <sub>MB</sub> , 0. <i>e</i> .	λ <sub>δΒЭ</sub> , o.e.	$\Pi^*_{MB}$ , o.e.	<i>a</i> <sub>MK</sub> , o.e.	λ <sub>δKЭ</sub> , o.e.	$\Pi^*_{CK}$ , o.e.	<i>a</i> <sub>MB</sub> , 0.e.	λ <sub>δΒЭ</sub> , 0.e.	$\Pi^*_{CB}$ , o.e.
	min	18	0,45	14,3	130,5	0,15	16,54	4,9	1,65	28,52	14,5	1,35	30,26
1,338	cp.	10	0,45	11,92	57	0,25	12,78	3,0	2,0	25,72	11,0	1,3	24,31
	max	9	0,55	10,67	49	0,25	10,94	2,5	2,3	24,51	9,5	1,3	21,67
	min	29	0,4	16,15	130,5	0,15	17,23	8,0	1,45	30,55	14,5	1,35	31,4
1,903	cp.	18,5	0,45	13,07	57	0,25	13,38	4,9	1,7	27,1	11,0	1,3	25,39
	max	13	0,55	11,65	49	0,25	11,52	4,2	1,7	25,73	9,5	1,3	22,71
	min	67,5	0,25	18,43	130,5	0,15	18,28	13,5	1,25	33,8	14,5	1,35	33,12
2,785	cp.	30,5	0,4	14,89	57	0,25	14,31	7,6	1,65	29,28	11,0	1,3	27,08
	max	23	0,45	13,07	49	0,25	12,41	6,1	1,75	27,05	9,5	1,3	24,31

Таблица 2

Показатели массы и стоимости активной части вариантов асинхронных короткозамкнутых шестиполюсных двигателей с внутренним и внешним ротором

γ <sub>1</sub> , α	).e.	<i>a</i> <sub>MK</sub> , o.e.	λ <sub>δKЭ</sub> , o.e.	П <sup>*</sup> <sub>MK</sub> , o.e.	<i>a</i> <sub>MB</sub> , o.e.	λ <sub>δΒЭ</sub> , o.e.	$\Pi^*_{MB}$ , o.e.	<i>a</i> <sub>MK</sub> , o.e.	λ <sub>δKЭ</sub> , o.e.	$\Pi^*_{CK}$ , o.e.	<i>a</i> <sub>MB</sub> , 0. <i>e</i> .	λ <sub>δΒЭ</sub> , o.e.	$\Pi^*_{CB}$ , o.e.
	min	32,7	0,25	8,42	244	0,08	9,19	8,7	1,0	18,23	48,8	0,4	17,67
1,338	cp.	17,2	0,4	6,91	129,5	0,11	6,97	7,2	1,15	16,49	28,5	0,5	14,61
	max	11,5	0,45	6,13	87	0,14	5,87	7,8	1,2	15,46	22,2	0,55	13,09
	min	58	0,2	9,29	244	0,08	9,51	14,8	0,8	19,2	48,8	0,4	18,31
1,903	cp.	31,3	0,27	7,51	129,5	0,11	7,26	10	1,0	17,13	28,5	0,5	15,22
	max	20,8	0,35	6,63	87	0,14	6,14	9,5	1,1	16,03	22,2	0,55	13,69
	min	113,3	0,15	10,51	244	0,08	9,98	28,5	0,6	20,77	48,8	0,4	19,27
2,785	cp.	61,8	0,2	8,39	129,5	0,11	7,69	15,3	0,85	18,19	31,7	0,55	16,15
	max	42,7	0,25	7,34	87	0,14	6,54	13,2	0,95	16,92	22,2	0,55	14,60

#### выводы

1. Показана возможность объективного (при соблюдении принципов электромагнитной эквивалентности и идентичности УП) сравнительного анализа различных структур и оптимизации геометрических соотношений АД на основе метода относительных показателей и обобщенных геометрических УП.

2. Функциональные зависимости масс и стоимости активных частей АДК с 2p = 2 и АДВР с  $2 \le 2p \le 8$  не содержат сочетаний УП  $a_{\rm MK(B)}$  и  $\lambda_{\delta K(B)}$ , обеспечивающих явно выраженные экстремумы. Массостоимостные показатели ЭМС таких АД улучшаются с уменьшением значений УП  $a_{\rm MK(B)}$  и при конкретных значениях  $a_{\rm MK(B)}$  характеризуются определенными экстремальными значениями  $\lambda_{\delta K(B)}$ .

3. Возможности минимизации  $a_{MK(B)}$  и  $D_{K(B)}$  АДК (АДВР) ограничены (целевые функции не существуют в некоторых областях малых  $a_{MK(B)}$ ) отрицательными значениями подкоренных слагаемых функциональных сомножителей  $f_{K2}(\lambda_{\delta K(B)}, a_{MK(B)})$  и  $f_{B1}(K_{3\pi}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{MK(B)})$ , то есть ограничены конструктивнотехнологической сложностью выполнения в пределах  $D_{RK}$  и  $D_{B}$  зубцово-пазовых структур, а минимизация  $a_{MB}$  и  $D_{B}$  АДВР дополнительно ограничена возможностью размещения лобовых частей обмотки статора.

4. Функциональные зависимости массы и стоимости ЭМС АДК  $2p \ge 4$  от УП  $\alpha_{MK}$  и  $\lambda_{\delta K}$  являются унимодальными функциями и характеризуются конкретными экстремальными значениями  $a_{MKЭ}$  и  $\lambda_{\delta KЭ}$ .

5. При 2p > 2 и в диапазоне возможных изменений значений коэффициентов  $\gamma_1$ ;  $\gamma_2$ ;  $K_{Bz}$ ;  $K_{Ba}$ ;  $K_{pm}$ ;  $K_D$ , АДВР отличается от электромагнитно-эквивалентного АДК улучшенными на 3...15 % показателями стоимости активной части.

6. При  $2p \ge 2$  и в зонах изменения  $\gamma_1$ , близких к граничним значениям 2,785 и 1,338; показатели массы ЭМС АДВР соответственно улучшаются до 11 % и ухудшаются до 15,6 % относительно электромагнитно-эквивалентного АДК. В области среднего значения  $\gamma_1$  показатели массы ЭМС указанных АД, в зависимости от принятых величин  $\gamma_2$ ;  $K_{Bz}$ ;  $K_{Ba}$ ;  $K_{pui}$ ;  $K_D$  могут отличаться в пределах  $\pm$  6 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования // Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 368 с.

2. Радин В.И. Рождение серии // Наука и техника. – 1985. – С. 38-44.

3. Volkrodt W. Neue wege im Electromaschinenbau // Electro-Jobr. – 1985. – P. 29-38.

4. Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых асинхронных двигателей // Электричество. – 1996. – №8. – С. 37-42.

5. Ставинский А.А. Асинхронные двигатели с тангенциальным смещением элементарных слоев стали статора // Электричество. – 1996. – №8. – С. 43-48.

6. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №1. – С. 57-61.

7. Конохов Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №3. – С. 36-38.

8. Ставинский А.А., Тищенко И.А., Зеленый Н.И. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей // Электротехнические и компьютерные системы. – 2010. – №01(77). – С. 64-69.



Рис. 5. Зависимости показателей массы (а) и стоимости (б) двухполюсной электромагнитной системы асинхронного двигателя с внутренним (—) и внешним (- - -) ротором



Рис. 6. Зависимости показателей массы (а) и стоимости (б) шестиполюсной электромагнитной системы асинхронного двигателя с внутренним (—) и внешним (- - -) ротором

9. Ставинский А.А. Усовершенствование конструкции короткозамкнутого ротора торцевого асинхронного двигателя для привода транспортных механизмов // Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр. – Киев: Институт электродинамики АН УССР. – 1988. – С. 96-103.

Ставинский А.А. Асинхронный двигатель с двухпакетным внешним ротором для привода судового встраиваемого вентилятора // Электротехническое производство. Передовой опыт и научно-технические достижения для внедрения. – 1990. – №6(30). – С. 4-7.

11. Ставинский А.А. Особенности магнитопроводов асинхронных двигателей с конической структурой зубцов // Известия Российской академии наук. Сер. Энергетика. – 1992. – №5. – С. 130-137.

12. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №1. – С. 44-48.

13. Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.

14. Ставинский А.А., Золотухин А.И., Янченко А.В. Снижение вибрации от электромагнитных источников колебаний в двухпакетных асинхронных двигателях // Электротехника. – 1991. – №8. – С. 33-36.

15. Ставинский А.А. Совершенствование судовых электромеханических систем встречного вращения на основе специальных асинхронных двигателей // Судостроение. – 2011. – №6. – С. 35-38.

16. Дмитриев В.Н., Кислицын А.Л. Исследование параметров и характеристик встроенных асинхронных двигателей. – Ульяновск.: УЛГТУ, 2012. – 280 с.

17. Руководящий документ РД 16538-89. Машины электрические малой мощности. Оценка уровня качества. – М.: ВНИИстандартэлектро, 1989. – 23 с.

18. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – №4. – С. 79-82.

19. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Вансач О.С. Определение геометрических соотношений активной части асинхронных двигателей погружного, высокооборотного и обращенного исполнений // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук. техн. зб. – 2001. – №57. – С. 67-72.

REFERENCES: 1. Dombrovskii V.V., Zaichik V.M. Asinkhronnye mashiny: teoriia, raschet, elementy proektirovaniia [Asynchronous machines: theory, calculation, design elements]. Leningrad, Energoatomizdat Publ, 1990. 368 p. 2. Radin V.I. Birth series. Nauka i tekhnika Science & Technology, 1985, pp. 38-44. 3. Volkrodt W. New paths in Electro Mechanical Engineering. Electro-Jobr., 1985, pp. 29-38. 4. Kazanskii V.M. Crisis and prospects for the development of small induction motors. Electrichestvo - Electricity, 1996, no. 8, pp. 37-42. 5. Stavinskii A.A. Induction motors with tangential displacement of elementary layers of steel stator. Electrichestvo - Electricity, 1996, no. 8, pp. 43-48. 6. Stavinskii A.A. Problem and the directions of electromechanical devices further evolution. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2004, no.1, pp.57-61. 7. Konokhov N.N. Structural analysis and principle of symmetry at perfection of electric machine design. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2007, no.3, pp. 36-38. 8. Stavinskii A.A., Tishchenko I.A., Zelenyi N.I. Prospects for further improvements and features of the induction of electromechanical and static converters. Elektrotekhnicheskie i komp'iuternye sistemy - Electrotechnic and Computer Systems, 2010, no. 01(77), pp. 64-69. 9. Stavinskii A.A. Usovershenstvovanie konstruktsii korotkozamknutogo rotora tortsevogo asinkhronnogo dvigatelia dlia privoda transportnykh mekhanizmov [Improving the design of the squirrel-cage rotor of the axial field motor for driving the transport mechanisms]. Reguliruyemye asynchronnye dvigateli. Sbornik nauchnykh trudov. Kiev, Institut Electrodinamiki AN USSR [Controlled asynchronous motors. The collection of scientific works. Kiev, Institute of Electrodynamics of Academy of Sciences of Ukrainian SSR], 1988, pp. 96-103. 10. Stavinskii A.A. Asynchronous motor with the two packet external rotor for driving the ship embedded fan. Elektrotekhnicheskoe proizvodstvo. Peredovoi opyt i nauchno-tekhnicheskie dostizheniia dlia vnedreniia -Electrotechnical Production. Best practices and scientific and technological developments for the implementation, 1990, no.6 (30), pp. 4-7.

11. Stavinskii A.A. Features of magnetic induction motors with conical structure of teeth. Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Energetika Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Ser. Energy, 1992, no.5, pp. 130-137. 12. Stavinskii A.A. Assignment and application features of special electrical machines. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2008, no.1, pp. 44-48. 13. Palastin L.M. Electrical machines of autonomous sources [Electric machines of independent power supply]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 464 p. 14. Stavinskii A.A., Zolotukhin A.I., Ianchenko A.V. Reduced vibration from sources of electromagnetic oscillations in two packet asynchronous motors. Elektrotehnika - Electrical Engineering, 1991, no.8, pp. 33-36. 15. Stavinskii A.A. Improvement of marine electromechanical counter rotating systems on the basis of special asynchronous motors. Sudostroenie - Shipbuilding, 2011, no.6, pp. 35-38. 16. Dmitriev V.N., Kislitsyn A.L. Issledovanie parametrov i kharakteristik vstroennykh asinkhronnykh dvigatelei [Study of parameters and characteristics of embedded asynchronous motors]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 2012. 280 p. 17. Rukovodiashchii dokument RD 16538-89. Mashiny elektricheskie maloi moshchnosti. Otsenka urovnia kachestva [Guidance Document RD 16538-89. Electrical machines of small capacity. Estimation of quality level]. Moscow, VNIIstandartelektro Publ., 1989. 23 p. 18. Stavinskii A.A., Plakhtyr' O.O., Stavinskii R.A. The quality parameters at structural optimization of spatial electromagnetic systems for tree-phase transformers, reactors and throttles. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2003, no.4, pp. 79-82. 19. Stavinskii A.A., Plakhtyr' O.O., Vansach O.S. Determination of geometric relationships of the active part of motors of submersible, high-speed and inverted versions. Elektpomashinobuduvannja ta elektroobladnanja: Resp. mizhvid. naukovo-tekhnichnii zbirnik - Electrical machine-building and electrical equipment: Republican interdepartmental scientific-technical collection, 2001, no.57, pp. 67-72.

#### Поступила (received) 30.05.2014

Ставинский Андрей Андреевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Пальчиков Олег Олегович<sup>1</sup>, аспирант, <sup>1</sup> Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,

54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9, тел/phone +38 0512 399453, e-mail: ole2013hulk@yandex.ua

A.A. Stavinskii<sup>1</sup>, O.O. Palchykov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National University of Shipbuilding named after admiral Makarov 9, Ave. Geroyev Stalingrada, Mykolaiv, 54025, Ukraine

Application of a relative technical level index method

to induction motor optimization problems.

On the basis of a method of relative technical level indices with relative geometric controlled variables, analytical expressions are derived to determine the optimum geometric dimensions of the squirrel-cage induction motor active part under criteria of the weight and the cost minimums. Comparative analysis of the mentioned indices for the conventional and the inverted stator and rotor designs is performed.

*Key words* – technical level indices, optimum geometric dimensions, conventional and inverted rotors.

УДК 621.316

Г.Г. Жемеров, И.О. Лобач

## УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В КОММУНАЛЬНЫХ SMART GRID СЕТЯХ ЗА СЧЕТ ПЕРЕХОДА ОТ ОДНОФАЗНЫХ К ТРЕХФАЗНЫМ СИСТЕМАМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Отримані аналітичні залежності показників ефективності переходу від однофазних до трифазних систем електропостачання – потужності втрат енергії та витрати міді.

Получены аналитические зависимости показателей эффективности перехода от однофазных к трехфазным системам электроснабжения – мощности потерь энергии и расхода меди.

#### ВВЕДЕНИЕ

Концепция построения систем электроснабжения коммунальных потребителей электроэнергии, зародившаяся в конце 19 века, практически не претерпела изменений до настоящего времени. Электроэнергия вырабатывается мощными генераторами трехфазного переменного напряжения с частотой 50 (60) Hz, установленными на электростанциях и объединенными в промышленную систему электроснабжения. Транспорт электроэнергии от электростанций до потребителей осуществляется по воздушно-кабельным линиям высокого напряжения. Вблизи потребителей электроэнергии устанавливаются трансформаторные подстанции, понижающие напряжение до среднего,  $1 \ kV < U_S \le 35 \ kV$ , или низкого,  $U_S \le 1 \ kV$ , уровня. В коммунальных сетях Украины понижающие трансформаторы имеют напряжения 10/0,38 kV или 6/0,38 kV. Особенностью коммунальных сетей электроснабжения является наличие нулевого вывода вторичной обмотки трансформатора и четырехпроводной линии, соединяющей обмотку трансформатора с нагрузкой. Нагрузки номинальной мощностью до 5-10 kW подключаются к одному из фазных выводов трансформатора и к нулевому проводу. Более мощные нагрузки подключаются к трем фазным проводникам [1, 2].

В последнее десятилетие интенсивно разрабатывается новая концепция построения системы электроснабжения (СЭ), получившая название "Smart Grid" [2-7]. Система электроснабжения будущего представляется как "Силовой Интернет" ("Power Internet"), в котором потребители энергии подключаются к сети по принципу "Plug and Play" и могут работать как в режиме потребления, так и в режиме генерации электроэнергии.

Успех практической реализации Smart Grid систем электроснабжения будет зависеть от степени уменьшения потерь электроэнергии при ее производстве, транспортировании и потреблении [5].

В настоящей статье рассматривается возможность уменьшения потерь электроэнергии в кабельных линиях, соединяющих трансформаторную подстанцию со зданиями, и в кабелях внутри зданий за счет перехода от однофазных систем питания к трехфазным.

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕХОДА ОТ ОДНОФАЗНОЙ К ТРЕХФАЗНОЙ СЭ

Для оценки эффективности предложенного технического решения рассмотрим пример, приведенный в [8]. На рис. 1 представлены эквивалентные схемы из [8] трехфазной симметричной (рис. 1,а) и однофазной (рис. 1,б) СЭ. В обеих схемах напряжения источников синусоидальные, нагрузки – активно-индуктивные и линейные.



Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной (а) и однофазной (б) СЭ

Обозначения, принятые на рис. 1: l – длина кабеля между источником и нагрузкой;  $u_{3a}$ ,  $u_{3b}$ ,  $u_{3c}$  – фазные синусоидальные напряжения трехфазного источника;  $u_l$  – синусоидальное напряжение однофазного источника;  $Z_{Loadl}$ ,  $Z_{Load3}$  – полное сопротивление нагрузки однофазной и трехфазной СЭ соответственно;  $R_{Cab1}$ ,  $R_{Cab3}$  – сопротивление одной жилы кабеля однофазной и трехфазной СЭ соответственно.

Соотношения для напряжений и токов в приведенных СЭ.

Напряжение и ток однофазного источника:

$$u_1 = U_{m1} \cdot \sin \vartheta , \qquad (1)$$

$$i_1 = I_{m1} \cdot \sin(\vartheta - \varphi), \qquad (2)$$

где  $U_{m1}$  – амплитуда синусоидального напряжения источника;  $I_{m1}$  – амплитуда тока однофазного источника;  $\varphi$  – угол сдвига между напряжением и током источника;  $\vartheta$  – безразмерное время:

$$\vartheta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t . \tag{3}$$

Напряжения и токи трехфазного источника:

$$u_{3a} = U_{m3} \cdot \sin \Theta,$$
  

$$u_{3b} = U_{m3} \cdot \sin \left(\Theta - \frac{2\pi}{3}\right),$$
  

$$u_{3c} = U_{m3} \cdot \sin \left(\Theta - \frac{4\pi}{3}\right),$$
  
(4)

```
© Г.Г. Жемеров, И.О. Лобач
```

$$i_{3a} = I_{m3} \cdot \sin(9 - \varphi),$$
  

$$i_{3b} = I_{m3} \cdot \sin\left(9 - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right),$$
  

$$i_{3c} = I_{m3} \cdot \sin\left(9 - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right),$$
  
(5)

где  $U_{m3}$  – амплитуда фазного напряжения трехфазного источника;  $I_{m3}$  – амплитуда тока трехфазного источника.

Сделаем допущение, что однофазная и трехфазная СЭ работают в установившемся режиме с одинаковыми углами сдвига  $\varphi$  и с одной и той же средней за период повторяемости активной мощностью нагрузки.

$$P_{Load1} = P_{load3} = P_{Load} , \qquad (6)$$

$$P_{Load1} = \frac{1}{2} \cdot U_{m1} \cdot I_{m1} \cdot \cos\varphi - R_{cab1} \cdot I_{m1}^2, \qquad (7)$$

$$P_{Load3} = \frac{3}{2} \cdot U_{m3} \cdot I_{m3} \cdot \cos\varphi - 3 \cdot R_{cab3} \cdot \frac{I_{m3}^2}{2} \,. \tag{8}$$

Введем коэффициент отношения амплитуд фазных напряжений:

$$k_U = \frac{U_{m1}}{U_{m3}} \,. \tag{9}$$

Возможный диапазон изменения коэффициента:

$$1 \le k_U \le \sqrt{3} \ . \tag{10}$$

Принимаем, что длины кабелей, *l*, и плотность тока в кабелях,  $\gamma$ , в однофазной и трехфазной СЭ одинаковы.

Сопоставим при принятых условиях потери энергии и расход меди в этих СЭ.

Поскольку величина мощности потерь для обеих СЭ является величиной изначально неизвестной, предположим, что она составляет от 0 до 10 % от соответствующей мощности сети:

$$\Delta P_{cab1} = R_{cab1} \cdot I_{m1}^2 = p_{1*} \cdot P_{S1} =$$
  
=  $p_{1*} \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{m1} \cdot I_{m1} \cdot \cos \varphi,$  (11)

$$\Delta P_{cab3} = 3 \cdot R_{cab3} \cdot \frac{I_{m3}^2}{2} = p_{3*} \cdot P_{S3} =$$

$$= p_{3*} \cdot \frac{3}{2} \cdot U_{m3} \cdot I_{m3} \cdot \cos \varphi,$$
(12)

где

$$p_{1*} = 0...0,1; p_{3*} = 0...0,1.$$
 (13)  
Из (6) – (13) получим:

$$I_{m3} = \frac{k_U \cdot I_{m1}}{3} \cdot \frac{(1 - p_{1^*})}{(1 - p_{3^*})}.$$
 (14)

Обозначим:

$$k_{\Delta P} = \frac{(1 - p_{1^*})}{(1 - p_{3^*})}.$$
(15)

В соответствии с (13) находим:  $k_{\Delta P}$ =0,9...1,111. Окончательно получим:

$$I_{m3} = \frac{k_U \cdot k_{\Delta P} \cdot I_{m1}}{3} \,. \tag{16}$$

Площадь поперечного сечения кабелей:

$$S_1 = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2} \cdot \gamma}, \qquad (17)$$

$$S_3 = \frac{I_{m3}}{\sqrt{2} \cdot \gamma} \,. \tag{18}$$

$$\frac{S_1}{S_3} = \frac{3}{k_U \cdot k_{\Delta P}} \,. \tag{19}$$

С учетом количества жил определим расход меди: - в однофазной СЭ:

$$\Delta M_1 = 2 \cdot S_1 \cdot l$$
; (20)  
- в трехфазной СЭ:

$$\Delta M_3 = 3 \cdot S_3 \cdot l \,. \tag{21}$$

Из (19) – (21) получим:  

$$\frac{\Delta M_3}{\Delta M_1} = \frac{k_U \cdot k_{\Delta P}}{2}.$$
(22)

Омические сопротивления одной жилы кабеля:

$$R_{cab1} = \rho \cdot \frac{l}{S_1} \,, \tag{23}$$

$$R_{cab3} = \rho \cdot \frac{l}{S_3}, \qquad (24)$$

где где р – удельное электрическое сопротивление проводникового материала.

Из (23), (24), (17), (18) получим:

$$R_{cab1} = \frac{\rho \cdot l \cdot \sqrt{2} \cdot \gamma}{I_{m1}}; \qquad (25)$$

$$R_{cab3} = \frac{\rho \cdot l \cdot 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \gamma}{k_U \cdot k_{\Delta P} \cdot I_{m1}} \,. \tag{26}$$

Мощность потерь энергии в кабелях определим с учетом количества жил из (7), (8), (25), (26):

$$\Delta P_{cab1} = \sqrt{2} \cdot \rho \cdot l \cdot \gamma \cdot I_{m1}; \qquad (27)$$

$$\Delta P_{cab3} = \frac{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot l \cdot \gamma \cdot I_{m1} \cdot k_U \cdot k_{\Delta P}}{2}.$$
 (28)

Из (27) и (28):  

$$\frac{\Delta P_{cab3}}{\Delta P_{cab1}} = \frac{k_U \cdot k_{\Delta P}}{2}.$$
(29)

На рис. 2 приведены зависимости, иллюстрирующие эффективность перехода от однофазной к трехфазной СЭ при различных значениях коэффициента  $k_{\Delta P}$ . Из полученных аналитических выражений видно, что при  $k_{\Delta P}=k_U=1$  потери энергии и расход меди уменьшаются в два раза.

Для определения порядка относительных потерь энергии в рассматриваемых СЭ выразим мощности потерь энергии в кабелях (11) и (12) с учетом (17), (18), (23) и (24). Запишем:

$$\Delta P_{cab1} = \sqrt{2} \cdot \rho \cdot l \cdot \gamma \cdot I_{m1}; \qquad (30)$$

$$\Delta P_{cab3} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \rho \cdot l \cdot \gamma \cdot I_{m3}. \tag{31}$$

Разделим обе части (30) и (31) на *P*<sub>Load</sub>, пренебрегая потерями в кабелях. В результате получим:

$$\frac{\Delta P_{cab1}}{P_{Load}} = \Delta P_{cab1^*} = 2\sqrt{2} \cdot \frac{\rho \cdot l \cdot \gamma}{U_{m1}};$$
(32)

$$\frac{\Delta P_{cab3}}{P_{Load}} = \Delta P_{cab3^*} = \sqrt{2} \cdot \frac{\rho \cdot l \cdot \gamma}{U_{m3}}.$$
(33)



Зададимся начальными данными для определения порядка относительных потерь энергии в рассматриваемых СЭ и анализа возможного увеличения коэффициента полезного действия (КПД) коммунальных SMART GRID сетей:

• амплитуда фазного напряжения источников  $U_{m1}=U_{m3}=311 V$ ;

• удельное электрическое сопротивление меди  $\rho$ =0,018 ( $\Omega$ ·mm<sup>2</sup>/m).

Рассчитаем удельные мощности потерь в проводниках различной длины для однофазной и трехфазной СЭ при двух значениях удельной плотности тока у согласно (32) и (33), сводим полученные результаты в табл. 1.

Таблица 1

Удельные мощности	потерь	в проводниках

l m	$\gamma=5 A/m$	nm <sup>2</sup>	$\gamma = 10 A/mm^2$		
<i>ı</i> , <i>m</i>	$\Delta P_{cabl^*}$	$\Delta P_{cab3}*$	$\Delta P_{cabl^*}$	$\Delta P_{cab3*}$	
10	0,00818	0,00409	0,01636	0,00818	
20	0,01636	0,00818	0,03273	0,01636	
30	0,02455	0,01227	0,04909	0,02455	
40	0,03273	0,01636	0,06545	0,03273	
50	0,04091	0,02045	0,08182	0,04091	
60	0,04909	0,02455	0,09818	0,04909	
70	0,05727	0,02864	0,11455	0,05727	
80	0,06545	0,03273	0,13091	0,06545	
90	0,07364	0,03682	0,14727	0,07364	
100	0,08182	0,04091	0,16364	0,08182	

Данные из табл. 1 демонстрируют, что в зависимости от разводки проводки и электрической нагрузки проводников (кабелей) переход от однофазной к трехфазной СЭ в коммунальных Smart Grid сетях позволят сэкономить не менее 1 % от потребляемой энергии.

При этом снижение потерь энергии и расхода меди при переходе от однофазной к трехфазной СЭ сопряжено с необходимостью разработки новых конструкций вилок и розеток, позволяющих подключаться как к трехфазному напряжению, так и к однофазному; переходом к трехфазным источникам питания и трехфазным двигателям в электронных и бытовых электроприборах; заменой однофазных осветительных приборов трехфазными.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

С целью подтверждения вышеизложенного материала выполнено моделирование однофазной и

трехфазной СЭ в пакете MATLAB/Simulink. Модели выполнены согласно эквивалентным схемам, представленным на рис. 1.

В качестве исходных данных для расчетов и моделирования были приняты:

• мощность нагрузки  $P_{Load} = 5 \ kW;$ 

• амплитуда фазного напряжения источника *U<sub>m1</sub>*=311 *V*;

- частота сети переменного тока  $f_S = 50 Hz;$
- удельная плотность тока  $\gamma$  не превышает 5  $A/mm^2$ .

Схема эксперимента для однофазной СЭ представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема эксперимента для однофазной СЭ

Виртуальный эксперимент проводился для нескольких значений длины проводников l, однако независимо от их длины мощность нагрузки была постоянной и равнялась  $P_{Load}$ . В качестве проводников выбраны медные провода с удельным электрическим сопротивлением  $\rho=0,018$  ( $\Omega\cdot mm^2/m$ ). Сопротивление проводящей линии рассчитываем согласно (23), а площадь поперечного сечения определяем из (17). Также выполняем расчет расхода меди согласно (20).

На рис. 4 приведена МАТLАВ-модель экспериментальной схемы по рис. 3, а в табл. 2 – результаты эксперимента.



Рис. 4. МАТLАВ-модель экспериментальной схемы для однофазной СЭ

Аналогично проведем моделирование трехфазной СЭ. Схема эксперимента представлена на рис. 5.





5	1		
Длина	Суммарное со-	Суммарная мощ-	Расход
провод-	противление про-	ность потерь в	меди
ников	водников $\Sigma R_{cab}$ ,	проводниках	$\Delta M_1 \cdot 10^3$ ,
<i>l</i> , <i>m</i>	Ω	$\Sigma P_{cab}, W$	$m^3$
10	0,0792	40,9	0,091
20	0,1584	81,8	0,182
30	0,2376	122,7	0,273
40	0,3168	163,6	0,364
50	0,3960	204,5	0,455
60	0,4752	245,4	0,545
70	0,5544	286,4	0,636
80	0,6336	327,3	0,727
90	0,7128	368,2	0,818
100	0,7920	409,1	0,909

Результаты эксперимента для однофазной СЭ

МАТLАВ-модель экспериментальной схемы приведена на рис. 6, а результаты эксперимента – в табл. 3.



Рис. 6. МАТLАВ-модель экспериментальной схемы для трехфазной СЭ

Таблица 3

Таблица 2

2	1	. 1 1	
Плино	Суммарное со-	Суммарная мощ-	Расход
длина	противление про-	ность потерь в	меди
провод-	водников $\Sigma R_{cab}$ ,	проводниках	$\Delta M_1 \cdot 10^3$ ,
ников і, т	Ω	$\Sigma P_{cab}, W$	$m^3$
10	0,3564	20,5	0,045
20	0,7128	40,9	0,091
30	1,0692	61,4	0,136
40	1,4256	81,8	0,182
50	1,7820	102,3	0,227
60	2,1384	122,7	0,273
70	2,4948	143,2	0,318
80	2,8512	163,6	0,364
90	3,2076	184,1	0,409
100	3,5640	204,5	0,455

Результаты эксперимента для трехфазной СЭ

На рис. 7 и 8 приведены диаграммы сравнения мощности потерь энергии в проводниках и расхода меди в однофазной и трехфазной СЭ.





Для уменьшения вероятности попадания под опасное для здоровья человека напряжение возможно уменьшение амплитуды фазного напряжения источников трехфазного напряжения относительно традиционного значения 311 V, т.е. коэффициента k<sub>U</sub>.

Рассмотрим влияние изменения коэффициента  $k_U$  на мощность потерь энергии в проводниках и расход меди в трехфазной СЭ относительно однофазной (табл. 2).

Алгоритм эксперимента:

1. Задаемся девятью значениями коэффициента  $k_U$  и длиной проводников l = 50 m.

2. Рассчитываем согласно (23) и (24) значения  $R_{cab3}$  при всех значениях коэффициента  $k_U$ .

3. Для каждого значения коэффициента  $k_U$  запускаем схемы, представленные на рис. 4 и 6, и считываем значения мощности потерь энергии в проводниках.

4. Рассчитываем расход меди согласно (21).

Таблица 4

Влияние коэффициента  $k_U$  на мощность потерь энергии в проводниках и расход меди при длине проводников l=50 m

	Суммарное со-	Суммарная мощ-	Расход
Коэффи-	противление про-	ность потерь в	меди
циент $k_U$	водников $\Sigma R_{cab}$ ,	проводниках	$\Delta M_1 \cdot 10^3$ ,
	Ω	$\Sigma P_{cab}, W$	$m^3$
1	1,782	102,27	0,227
1,1	1,620	112,50	0,250
1,2	1,485	122,73	0,273
1,3	1,371	132,95	0,295
1,4	1,273	143,18	0,318
1,5	1,188	153,41	0,341
1,6	1,114	163,64	0,364
1,7	1,048	173,86	0,386
1,732 (√3)	1,029	177,18	0,394

Кривая на рис. 9 демонстрирует, что даже при уменьшении амплитуды фазного напряжения трех-



фазных источников напряжения до 180 V мощность потерь энергии в проводниках и расход меди более чем на 10 % меньше по сравнению с СЭ с однофазным источником напряжения с амплитудой 311 V.

#### выводы

1. Переход в коммунальных сетях от однофазных к трехфазным СЭ позволяет уменьшить потери энергии и расход проводниковых материалов. Эффективность зависит от величины мощности потерь и отношения амплитуд фазных напряжений обеих СЭ. Так для равных значений этих параметров потери энергии и расход проводникового материала уменьшается в два раза.

2. Эффективность перехода от однофазных к трехфазным СЭ подтверждена экспериментальным путем с помощью виртуальных моделей, разработанных в пакете MATLAB/Simulink. Увеличение длины проводников приводит к пропорциональному увеличению потерь энергии и расхода меди.

3. Уменьшение амплитуды фазного напряжения трехфазной СЭ относительного традиционных 311 V приводит к увеличению потерь энергии и расхода меди. Даже при уменьшении напряжения в  $\sqrt{3}$  раз переход к трехфазным СЭ позволит экономить более 10 % проводникового материала.

4. При переходе от однофазных к трехфазным коммунальным Smart Grid сетям можно ожидать экономии более 1 % от потребляемой энергии, в зависимости от длины проводников (кабелей) и их электрической нагрузки.

5. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации коммунальных Smart Grid сетей для малых промышленных предприятий, жилых и коммерческих зданий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Short T.A. Electric power distribution equipment and system. – Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2006. – 318 p.

2. Smart Grids. Opportunities, Developments and Trends [Edited by A. Shawkat Ali]. – London: Springer-Verlag, 2013. – 230 p.

3. Алексеев Б.А. Планы повышения эффективного использования электроэнергии в Европе: роль силовой электроники // Энергоэксперт. – 2009. - №6. – С. 82-84.

4. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П.. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні// Технічна електродинаміка. – 2012. – №5. – С. 52-65.

5. Сокол Е.И., Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Силовая электроника и концепция развития энергетики "Smart Grid" // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – Спецвыпуск. т.1, №8 (114). – С. 7-16. 6. Boyd J. An internet-inspired electricity Grid // IEEE Spectrum.  $-2013. - N_{2}1. - pp. 12-13.$ 

7. Huang A., Heydt G., Dall S., Zheng J., Crow M. Energy internet – future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) systems // IEEE Power Society News letter. – 2008. – 4th Quarter. – pp. 8-9.

8. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Ковальчук О.И. КПД систем электроснабжения однофазного переменного напряжения прямоугольной и синусоидальной формы // Технічка електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2010. – Ч.2. – С. 7-15.

REFERENCES: 1. Short T.A. Electric power distribution equipment and system. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press Publ., 2006. 318 p. 2. Smart Grids. Opportunities, Developments and Trends [Edited by A. Shawkat Ali]. London, Springer-Verlag Publ., 2013. 230 p. 3. Alekseev B.A. Plans to increase the efficient use of electricity in Europe: the role of power electronics. Energoekspert - Energoexpert, 2009, no.6, pp. 82-84. 4. Stogniy B.S., Kirilenko O.V., Prakhovnik A.V., Denysiuk S.P. The evolution of smart grids and their prospects in Ukraine. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics, 2012, no.5, pp. 52-65. 5. Sokol E.I., Zhemerov G.G., Tugay D.V. Power electronics and energy development concept "Smart Grid". Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit Energy saving. Power engineering. Energy audit, Special Issue, 2013, vol.1, no.8(114), pp. 7-16. 6. Boyd J. An internet-inspired electricity Grid. IEEE Spectrum, 2013, no.1, pp. 12-13. 7. Huang A., Heydt G., Dall S., Zheng J., Crow M. Energy internet - future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) systems. IEEE Power Society News letter, 2008, 4th Quarter, pp. 8-9. 8. Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Kovalchuk O.I. Efficiency of the power supply system single-phase AC-voltage rectangular and sinusoidal. Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk "Silova elektronika i energoefektivnist" – Technical electrodynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency", 2010, Part 2, pp. 7-15.

#### Поступила (received) 14.07.2014

Жемеров Георгий Георгиевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Лобач Игорь Олегович<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт",

61002, Харьков, ул. Фрунзе 21,

тел/phone +38 057 7076312,

e-mail: zhemerov@gmail.com, i.o.lobach@yandex.ua

#### *G.G. Zhemerov*<sup>1</sup>, *I.O. Lobach*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### Energy loss reduction in Smart Grid utilities for account of transition from single-phase to three-phase power distribution systems.

Analytical dependences of such efficiency indices as energy loss power and copper consumption under transition from single-phase power distribution systems to three-phase ones are obtained.

*Key words* – energy loss, copper consumption, power distribution system, Smart Grid.

УДК 621.3.01

В.М. Боев

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ КАБЕЛЯ С ДВУХСЛОЙНЫМ ЭКРАНОМ

Наведено розрахунок електромагнітного поля коаксіального кабелю з двошаровим екраном. Для опису питомої електponpoвідності і магнітної проникності використані розривні функції, що дало можливості розв'язувати задачу для всього простору, що містить кабель, як однозв'язної області.

Приведен расчет электромагнитного поля коаксиального кабеля с двухслойным экраном. Для описания удельной электропроводности и магнитной проницаемости использованы разрывные функции, что дало возможности решать задачу для всего пространства, содержащего кабель, как односвязной области.

В работе [1] задача расчета электромагнитного поля в тороидальной области сведена к расчету поля в цилиндрической области, содержащей проводник с током и охватывающий его ферромагнитный экран. В первом приближении это может быть полем силового кабеля. Обычно металлическая оплетка силовых кабелей выполняется из неферромагнитного электропроводящего материала. Поэтому в формулах, полученных в [1], достаточно заменить магнитную проницаемость стали µ<sub>c</sub> на µ<sub>0</sub>, чтобы описать поле такого кабеля. Однако, существует необходимость более эффективного экранирования электромагнитного поля силовых кабелей, особенно в трехфазных кабельных линиях, что может быть достигнуто применением комбинированного экрана, состоящего из электропроводного и ферромагнитного слоев [2]. На рис. 1 представлен проводник радиуса  $r_1$  с током *IW*, электропроводный экран (радиусы r2 и r3, удельная электропроводность  $\gamma_1$ ) и ферромагнитный экран (радиусы  $r_3$ и  $r_4$ , удельная электропроводность  $\gamma_2$ , магнитная проницаемость µ<sub>c</sub>).



Уравнения Максвелла для такой задачи имеют вид:

$$rot\overline{H} = \overline{j} + \gamma(r)\overline{E}; \ rot\overline{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}; \ \overline{H} = \frac{1}{\mu}\overline{B}.$$

 $\left(\frac{B}{r_0}, \frac{U}{\sigma_0}, \frac{U}{z_0}\right)$  учтем, что вектор напряженности электоры магнитного поля имеет только *z*-составляющую, а векторы магнитного поля – только *φ*-составляющую, и запишем эти уравнения в комплексной форме (полагая электромагнитный процесс гармоническим):

Здесь мы использовали разрывные функции для описания плотности тока j, удельной электропроводности  $\gamma(r)$  и магнитной проницаемости  $1/\mu$  всего пространства, содержащего наше устройство.

Подставляя  $\dot{B}$  и  $\dot{H}$  в первое уравнение, получим дифференциальное уравнение для напряженности электрического поля  $\dot{E}$ :

$$\frac{1}{i\omega} \left( \frac{d^{2}\dot{E}}{dr^{2}} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{E}}{dr} \right) \left[ \frac{1}{\mu_{0}} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\mu_{c}} - \frac{1}{\mu_{0}} \right) \left( \frac{|r - r_{3}|}{r - r_{3}} - \frac{|r - r_{4}|}{r - r_{4}} \right) \right] + \frac{1}{i\omega} \left( \frac{1}{\mu_{c}} - \frac{1}{\mu_{0}} \right) \left[ \delta(r - r_{3}) - \delta(r - r_{4}) \right] \frac{d\dot{E}}{dr} =$$

$$= \frac{\dot{I}W}{\pi r_{1}^{2}} \cdot \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{|r - r_{1}|}{r - r_{1}} \right) + \frac{\gamma_{1}}{2} \left( \frac{|r - r_{2}|}{r - r_{2}} - \frac{|r - r_{3}|}{r - r_{3}} \right) \dot{E} + \frac{\gamma_{2}}{2} \left( \frac{|r - r_{3}|}{r - r_{3}} - \frac{|r - r_{4}|}{r - r_{4}} \right) \dot{E}.$$
(1)

Разобьем дифференциальное уравнение (1) по слоям:

1) 
$$r < r_1; \frac{1}{i\omega\mu_0} \left( \frac{d^2\dot{E}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{E}}{dr} \right) = \frac{\dot{I}W}{\pi r_1^2};$$
  
2)  $r_1 < r < r_2; r > r_4; \frac{d^2\dot{E}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{E}}{dr} = 0;$   
3)  $r_2 < r < r_3; \frac{1}{i\omega\mu_0} \left( \frac{d^2\dot{E}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{E}}{dr} \right) - \gamma_1 \dot{E} = 0;$   
4)  $r_3 < r < r_4; \frac{1}{i\omega\mu_c} \left( \frac{d^2\dot{E}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{E}}{dr} \right) - \gamma_2 \dot{E} = 0.$ 

Решение уравнения 2) имеет вид:

$$E = A_1 \ln r + A_2 \,.$$

<sup>©</sup> В.М. Боев

Для области  $r > r_3$  следует учесть, что при  $r = r_0$  напряженность поля E = 0. Тогда общий вид решения для этой области определяется формулой

$$\dot{E} = A_1 \ln \frac{r}{r_0}$$

Например, для трехфазной кабельной линии расстояние  $r = r_0$  можно выбрать равным половине расстояния между соседними проводами (учитывая, что в каждый конкретный момент времени ток течет по одной фазе в прямом направлении, по другой (или двум другим) в обратном, следовательно, в средней точке между фазами  $E \approx 0$ ).

Решение уравнения 1) также не представляет затруднений и имеет вид

$$\dot{E} = \frac{\dot{I}Wi\omega\mu_0}{4\pi r_1} \cdot r^2 + A_1 \ln r + A_2$$

Из граничного условия для r = 0 следует, что  $A_1 = 0$ , тогда общий вид решения будет следующим:

$$\dot{E} = \frac{IWi\omega\mu_0}{4\pi r_1} \cdot r^2 + A_2 \,.$$

Уравнения 3), 4) – это уравнения Бесселя, решение которых известно

$$\dot{E} = A_1 I_0(ar) + A_2 K_0(ar),$$

где  $a = \sqrt{i\omega\mu_c\gamma}$ ;  $I_0(ar)$ ,  $K_0(ar)$  – модифицированные функции Бесселя.

Тогда общий вид решения дифференциального уравнения (1) может быть записан с использованием разрывных функций следующим образом:

$$\begin{split} \dot{E} &= \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{|r - r_1|}{|r - r_1|} \right) \cdot \left( \frac{iWi\omega\mu_0}{4\pi r_1^2} \cdot r^2 + A_1 \right) + \\ &+ \frac{1}{2} \left( \frac{|r - r_1|}{|r - r_1|} - \frac{|r - r_2|}{|r - r_2|} \right) \cdot \left( A_2 \ln r + A_3 \right) + \\ &\frac{1}{2} \left( \frac{|r - r_2|}{|r - r_2|} - \frac{|r - r_3|}{|r - r_3|} \right) \times \left[ A_4 I_0(\alpha_1 r) + A_5 K_0(\alpha_1 r) \right] + \quad (2) \\ &+ \frac{1}{2} \left( \frac{|r - r_3|}{|r - r_3|} - \frac{|r - r_4|}{|r - r_4|} \right) \cdot \left[ A_6 I_0(\alpha_2 r) + A_7 K_0(\alpha_2 r) \right] + \\ &+ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{|r - r_4|}{|r - r_4|} \right) A_6 \ln \frac{r}{r_0}. \end{split}$$

Подставляя (2) в дифференциальное уравнение (1) и приравнивая множители при одинаковых разрывных функциях, получим систему алгебраических уравнений:

1) 
$$\delta(r-r_1)$$
;  $\frac{1}{i\omega r_1 \mu_0} \left( \frac{\dot{I}Wi\omega \mu_0}{4\pi r_1^2} \cdot r_1^2 + A_1 \right) - (A_2 \ln r_1 + A_3) \frac{1}{i\omega r_1 \mu_0} + \frac{\dot{I}Wi\omega \mu_0}{4\pi r_1^2} \cdot r_1 \cdot \frac{1}{i\omega \mu_0} - \frac{A_2}{r_1} \cdot \frac{1}{i\omega \mu_0} = 0.$   
2)  $\delta'(r-r_1)$ ;  $\frac{1}{i\omega \mu_0} \left( \frac{\dot{I}Wi\omega \mu_0}{4\pi r_1^2} \cdot r_1^2 + A_1 \right) = \frac{1}{i\omega \mu_0} (A_2 \ln r_1 + A_3),$   
T.e.  $A_3 + A_2 \ln r_1 - A_1 = \frac{\dot{I}Wi\omega \mu_0}{4\pi}.$ 

3) 
$$\delta(r - r_2)$$
;  $\frac{1}{i or_2 \mu_0} [4_2 \ln r_2 + A_3 - A_4 I_0(a_1 r_2) - A_5 K_0(a_1 r_2)]$ ;  
+  $\frac{1}{i o \mu_0} \cdot \left[\frac{A_2}{r_2} - A_4 \alpha_1 I_1(a_1 r_2) + A_5 \alpha_1 K_1(a_1 r_2)\right] = 0.$   
4)  $\delta'(r - r_2)$ ;  $A_3 + A_2 \ln r_2 = A_4 I_0(\alpha_1 r_2) + A_5 K_0(\alpha_1 r_2)$ .  
5)  $\delta(r - r_3)$ ;  $\frac{1}{i o or_3} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_c}\right) [A_4 I_0(\alpha_1 r_3) + A_5 K_0(\alpha_1 r_3) - A_6 I_0(\alpha_2 r_3) - A_7 K_0(\alpha_2 r_3)] - \frac{1}{i o o} \left(\frac{1}{\mu_c} - \frac{1}{\mu_0}\right) \times \frac{1}{2} \left[A_4 \alpha_1 I_1(\alpha_1 r_3) - A_5 \alpha_1 K_1(\alpha_1 r_3) + A_5 K_0(\alpha_1 r_3) - A_6 \alpha_2 I_1(\alpha_2 r_3) - A_7 \alpha_2 K_1(\alpha_2 r_3)] + \frac{1}{i o 2} \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_c}\right) \times \left[A_4 \alpha_1 I_1(\alpha_1 r_3) - A_5 \alpha_1 K_1(\alpha_1 r_3) - A_6 \alpha_2 I_1(\alpha_2 r_3) - A_7 \alpha_2 K_1(\alpha_2 r_3)] = 0.$   
6)  $\delta'(r - r_3)$ ;  $\frac{1}{i o or_2} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_c}\right) \left[A_4 I_0(\alpha_1 r_3) + A_5 K_0(\alpha_1 r_3) - A_6 I_0(\alpha_2 r_3) - A_7 K_0(\alpha_2 r_3)] = 0.$   
7)  $\delta(r - r_4)$ ;  $\frac{1}{i o or_4} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_c}\right) \times \left[A_6 I_0(\alpha_2 r_4) - A_7 \alpha_2 K_1(\alpha_2 r_4) - A_8 \ln \frac{r_4}{r_0}\right] + \frac{1}{i o 2} \left(\frac{1}{\mu_c} - \frac{1}{\mu_0}\right) \times \left[A_6 \alpha_2 I_1(\alpha_2 r_4) - A_7 \alpha_2 K_1(\alpha_2 r_4) - A_8 \frac{1}{r_4}\right] = 0.$   
8)  $\delta'(r - r_4)$ ;  $\frac{1}{i o or_2} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_c}\right) \times \left[A_6 I_0(\alpha_2 r_4) - A_7 \alpha_2 K_1(\alpha_2 r_4) - A_8 \ln \frac{r_4}{r_0}\right] = 0.$   
H3 ypabhenuit 1) - 8) haxodum:  
1 $A_1 = A_3 - \frac{i W i o \mu_0}{2 \pi} \cdot (1 - 2 \ln r_1);$   
2 $A_2 = \frac{i W i o \mu_0}{2 \pi} + A_5 \frac{K_1(\alpha_1 r_2)}{I_1(\alpha_1 r_2)} + A_5 \frac{K_1(\alpha_1 r_2)}{I_1(\alpha_1 r_2)};$ 

ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2014. №4

$$\begin{split} & 5 \left| A_{5} \left[ K_{0}(\alpha_{1}r_{3}) + \dot{I}_{0}(\alpha_{1}r_{3}) \frac{K_{1}(\alpha_{1}r_{2})}{\dot{I}_{1}(\alpha_{1}r_{2})} \right] + \\ & + \dot{I}_{0}(\alpha_{1}r_{3}) \frac{\dot{I}Wi\omega\mu_{0}}{2\pi r_{2}\alpha_{1}\dot{I}_{1}(\alpha_{1}r_{2})} = A_{6}\dot{I}_{0}(\alpha_{2}r_{3}) + A_{7}K_{0}(\alpha_{2}r_{3}); \\ & 6 \frac{1}{\mu_{0}} \alpha_{1} \left[ A_{4}\dot{I}_{1}(\alpha_{1}r_{3}) - A_{5}K_{1}(\alpha_{1}r_{3}) \right] = \\ & = \frac{1}{\mu_{c}} \alpha_{2} \left[ A_{6}\dot{I}_{1}(\alpha_{2}r_{3}) - A_{7}K_{1}(\alpha_{2}r_{3}) \right] \\ & 7 \left[ A_{6}\dot{I}_{0}(\alpha_{2}r_{4}) + A_{7}K_{0}(\alpha_{2}r_{4}) = A_{8}\ln\frac{r_{4}}{r_{0}}; \\ & 8 \frac{1}{\mu_{c}} \left[ A_{6}\alpha_{2}\dot{I}_{1}(\alpha_{2}r_{4}) - A_{7}\alpha_{2}K_{1}(\alpha_{2}r_{4}) \right] = \frac{A_{8}}{\mu_{0}} \frac{1}{r_{4}}; \\ & 7 \left| A_{8} = r_{4} \left[ A_{6}\alpha_{2}\dot{I}_{1}(\alpha_{2}r_{4}) - A_{7}\alpha_{2}K_{1}(\alpha_{2}r_{4}) \right] \right] + \\ & 4_{6} \left[ \dot{I}_{0}(\alpha_{2}r_{4}) - \frac{r_{4}\alpha_{2}\mu_{0}}{\mu_{c}} \dot{I}_{1}(\alpha_{2}r_{4}) \ln\frac{r_{4}}{r_{0}} \right] + \\ & + A_{7} \left[ K_{0}(\alpha_{2}r_{4}) - \frac{r_{4}\alpha_{2}\mu_{0}}{\mu_{c}} \dot{I}_{1}(\alpha_{2}r_{4}) \ln\frac{r_{4}}{r_{0}} \right] + \\ & 4_{6} \left[ I_{0}(\alpha_{2}r_{4}) + \frac{r_{4}\alpha_{2}\mu_{0}}{\mu_{c}} K_{1}(\alpha_{2}r_{4}) \ln\frac{r_{4}}{r_{0}} \right] = 0; \\ & 9 \left| A_{5} \left[ K_{0}(\alpha_{1}r_{3}) + I_{0}(\alpha_{1}r_{3}) \frac{K_{1}(\alpha_{1}r_{2})}{I_{1}(\alpha_{1}r_{2})} \right] + \frac{I_{0}(\alpha_{1}r_{3})}{I_{0}(\alpha_{2}r_{4}) \ln\frac{r_{4}}{r_{0}}} \right] = \\ & = A_{6} \left[ I_{0}(\alpha_{2}r_{3}) - K_{0}(\alpha_{2}r_{3}) \frac{I_{0}(\alpha_{2}r_{4}) - \frac{\mu_{0}}{\mu_{c}} r_{4}\alpha_{2}\dot{I}_{1}(\alpha_{2}r_{4}) \ln\frac{r_{4}}{r_{0}}}{K_{0}(\alpha_{2}r_{4}) + \frac{\mu_{0}}{\mu_{c}} r_{4}\alpha_{2}\dot{I}_{1}(\alpha_{2}r_{4}) \ln\frac{r_{4}}{r_{0}}} \right] \\ & 10 \left| \frac{\alpha_{1}}{\mu_{0}} \left[ \frac{iWi\omega\mu_{0}I_{1}(\alpha_{1}r_{3})}{2\pi r_{2}\alpha_{1}I_{1}(\alpha_{1}r_{2})} + A_{5} \left( \frac{K_{1}(\alpha_{1}r_{2})}{I_{1}(\alpha_{1}r_{2})} - \frac{\mu_{0}}{\mu_{c}} r_{4}\alpha_{2}\dot{I}_{1}(\alpha_{2}r_{4}) \ln\frac{r_{4}}{r_{0}}} \right] \right] \right] \\ & = A_{6} \frac{\alpha_{2}}{\mu_{n}} \left[ I_{1}(\alpha_{2}r_{3}) + K_{1}(\alpha_{2}r_{3}) \frac{I_{0}(\alpha_{2}r_{4}) - \frac{\mu_{0}}{\mu_{c}} r_{4}\alpha_{2}\dot{I}_{1}(\alpha_{2}r_{4}) \ln\frac{r_{4}}{r_{0}}} \right] \right] \right] \\ \end{array}$$

Подставляя числовые значения в эту систему уравнений, находим постоянные коэффициенты  $A_1 - A_8$ , а значит и решение (2). При этом следует иметь в виду, что модифицированные бесселевы функции  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $K_0$ ,  $K_1$  от аргументов, у которых мнимая единица *i* стоит под корнем, определяются через функции Кельвина [3].

$$\begin{split} \alpha_1 &= \sqrt{i \omega \mu_0 \gamma_1} = \sqrt{\omega \mu_0 \gamma_1} \sqrt{i} = \alpha'_1 \sqrt{i} ; \\ \alpha_2 &= \sqrt{i \omega \mu_c \gamma_2} = \sqrt{\omega \mu_c \gamma_2} \sqrt{i} = \alpha'_2 \sqrt{i} ; \\ I_0 \Big( \alpha' r \sqrt{i} \Big) &= b e r \alpha' r + i b e i \alpha' r ; \\ i I_1 \Big( \alpha' r \sqrt{i} \Big) &= b e r_1 \alpha' r + i b e i_1 \alpha' r ; \\ K_0 \Big( \alpha' r \sqrt{i} \Big) &= k e r \alpha' r + i k e i \alpha' r ; \\ i^{-1} K_1 \Big( \alpha' r \sqrt{i} \Big) &= k e r_1 \alpha' r + i k e i_1 \alpha' r . \end{split}$$

Индукция магнитного поля определяется по формуле  $\dot{B} = \frac{1}{i\omega} \cdot \frac{d\dot{E}}{dr}$ . Например, перед электропроводящим слоем она равна  $\dot{B} = \frac{A_2}{i\omega r_2}$ , а непосредственно

за ферромагнитным  $\dot{B} = \frac{A_6}{i\omega r_4}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боев В.М. Разрывные функции в электротехнике. Расчет электромагнитного поля в тороидальной области // Вісник НТУ "ХПІ". – 2001. – №16. – С. 7-10.

2. Титко А.И. Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах. – К.: Наукова думка, 1994. – 304 с.

3. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. Пер. с англ. – М.: Наука, 1977. – 224 с.

**REFERENCES:** *I.* Boev V.M. Discontinuous functions in electrical engineering. Calculation of the electromagnetic field in a toroidal region. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2001, no.16, pp. 7-10. *2.* Titko A.I. *Elektromagnitnoe ekranirovanie nezamknutymi strukturami v elektricheskikh mashinakh* [Electromagnetic shielding of open structures in electrical machines]. Kyiv., Naukova Dumka Publ., 1994. 304 p. *3.* Dwight G.B. *Tablitsy integralov i drugie matematicheskie formuly* [Tables of integrals and other mathematical formulas]. Moscow., Nauka Publ., 1977. 224 p.

Поступила (received) 24.06.2014

Боев Вячеслав Михайлович, д.т.н., проф., Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076961

#### V.M. Boev

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### Electromagnetic field of a cable with a two-layer shield.

The paper presents electromagnetic field calculations for a coaxial cable with a double-layer shield. To describe the conductivity and permeability, discontinuous functions are applied, which makes it possible to solve the problem regarding the whole space containing the cable as a simply connected domain.

*Key words* – electromagnetic field, coaxial cable, discontinuous functions.

В.Я. Кутковецький

## ЯВИЩЕ МИТТЄВОЇ ПЕРЕДАЧІ ПОТЕНЦІЙНОЇ ЕНЕРГІЇ МІЖ ЕЛЕКТРИЧНИМИ КОНТУРАМИ ТА СИСТЕМАМИ

Передача накопиченої потенційної електромагнітної енергії між замкненими контурами може відбуватись миттєво, без зміни її величини і без виконання еквівалентної роботи. В результаті замкнений контур чи окрема електрична система може отримувати дарову енергію з інших контурів або систем.

Передача накопленной потенциальной электромагнитной энергии между замкнутыми контурами может осуществляться мгновенно, без изменения ее величины и без выполнения эквивалентной работы. В результате замкнутый контур или отдельная электрическая система может получать даровую энергию от других контуров или систем.

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Передача електричної енергії між електричними системами звичайно виконується за рахунок електричного з'єднання, перетворення енергії за допомогою електромагнітних пристроїв та електромагнітного випромінювання. Подібний обмін енергією між електромагнітними системами звичайно відбувається на основі дотримання: законів Кірхгофа, закону електромагнітної індукції Фарадея, відповідної системи рівнянь Максвелла, закону визначення електромагнітної сили, закону збереження енергії, виконання роботи при накопиченні потенціальної енергії магнітного та електричного полів.

При цьому звичайно не розглядається явище дарової (без втрат) миттєвої передачі потенційної накопиченої енергії між замкненими контурами при зміні структури схеми, <u>хоча на практиці воно й використовується</u>. Ми не задаємо питань: "Чи є коректними основні закони електротехніки стосовно нових створених замкнених контурів при зміні топології схеми?", "Чи можуть ці нові замкнені контури працювати за рахунок енергії, отриманої з інших систем?". Підгрунтям для подібних питань є те, що при зміні структури схеми чи при зміні магнітного зв'язку між контурами нові контури <u>без виконання роботи (тобто у</u> <u>вигляді "дару") миттєво</u> отримують енергію магнітного чи електричного поля, накопичену за час попередньої роботи.

Для нас не є новиною схема циклічного заряду по одному контуру високовольтного конденсатора з наступним його розрядом на навантаження по іншому окремому ізольованому контуру через розрядники з повітряними проміжками. Але слова "миттєва передача енергії від одного до іншого контуру без виконання роботи" (миттєве накопичення енергії в контурі) викликають справедливий внутрішній протест, бо енергія накопичується у замкненому контурі поступово (з виконанням відповідної роботи), і потужність при накопиченні потенціальної енергії не може набувати нескінченно великого значення. Все це вірно, але разом з тим згадана реальна схема заряду розряду конденсатора прямо свідчить про те, що розрядний контур, не приймаючі участі у заряді конденсатора, користується у вигляді "дару" виконаною роботою іншого контуру.

Виявляється, що і накопичена електромагнітна енергія магнітного поля (яка отримується з відповід-

ними втратами) теж може передаватись між контурами окремих систем у вигляді "дару". Зрозуміло, що у дійсності в електричних схемах це "дарування" енергії відбувається з відповідними втратами енергії і мова йде лише про невідповідність цих втрат величині "дарованої" енергії.

Процес раптової зміни магнітного потоку замкненого знеструмленого контуру без наведення електрорушійної сили (ЕРС) та без виконання роботи в фаховій літературі [3, с. 83 - 86] розглянутий лише з точки зору пояснення описаного Фарадеєм явища електромагнітної індукції - обов'язкового перетинання провідником магнітних силових ліній.

Але зміна магнітного поля замкненого контуру без наведення ЕРС і передача контуру цим полем власної накопиченої енергії без виконання роботи суперечить закону електромагнітної індукції та закону накопичення контуром потенційної енергії. Тому це фізичне явище потребує окремого розгляду. Цій проблемі і присвячена дана стаття.

#### META CTATTI

Метою статті є розгляд явища передачі накопиченої потенціальної електромагнітної енергії між замкненими контурами у сукупності окремих електромагнітних систем.

#### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Явища, які відбуваються при зміні накопиченої потенціальної електромагнітної енергії магнітних та електричних полів замкненого контуру детально розглянуті з теоретичного і практичного боку у фаховій літературі і описуються:

1. <u>Законами Кірхгофа</u>.

2. <u>Законом електромагнітної індукції Фарадея</u> <u>для визначення ЕРС</u>

$$e = -P \frac{d\Phi}{dt} , \qquad (1)$$

де  $d\Phi$  – зміна магнітного потоку контуру; dt – крок у часі; P – перемикаюча функція, яка має значення 1 у випадку дотримання умов Фарадея (перетинання провідниками замкненого контуру безперервних магнітних силових ліній; обмеженість розмірів магнітопроводу) і дорівнює 0 у іншому випадку. 3. <u>Системою рівнянь Максвелла у сучасному</u> вигляді:

$$rotE = -P \frac{\partial B}{\partial t}; rotH = j + \frac{\partial D}{\partial t}; divD = \rho; divB = 0, (2)$$

де E – напруженість електричного поля; B - магнітна індукція, яка відповідає визначеній величині магнітного потоку  $\Phi$ ; H – напруженість магнітного поля; j – щільність електричного струму; D – електрична індукція;  $\rho$  – щільність електричного заряду [4].

При цьому магнітний потік замкненого контуру, який визначає його накопичену електромагнітну енергію, розраховується за формулою

$$\Phi = \oint_{S} BdS \,. \tag{3}$$

Академік В.Ф. Миткевич наполягав на тому, щоб у формулі  $e_2 = -d\Phi_2/dt$  (яку він звав формулюванням Максвелла) обов'язково ураховувалось обмеження Фарадея – перетинання провідниками контуру безперервних магнітних силових ліній [3, с. 83-86].

Для доведення необхідності цього кроку В.Ф. Миткевич дав опис ряду експериментів, які розглянуті нижче на рис. 1-3. На рис. 1 по первинній обмотці трансформатора  $w_1$  протікає постійний струм і створює у магнітопроводі постійний магнітний потік  $\Phi_2$ , а замкнений на гальванометр *G* один виток вторинної обмотки  $w_2 = 1$  при ковзанні по електропровідному "кільцю" "стрибком" змінює свій магнітний потік з нуля на  $\Phi_2$  [3, с. 83].

Електропровідне "кільце"



Рис. 1. Дослід В.Ф. Миткевича (1901 р.)

Але при цьому за законом (1) ЕРС не створюється із-за відсутності процесу пересічення провідником магнітних силових ліній (бо P=0, і ми маємо e = 0). Згідно експерименту рис. 1 збільшення магнітного потоку і передача накопиченої в ньому енергії контуру витка  $w_2$  може відбуватись миттєво і не супроводжується виконанням еквівалентної роботи.

На рис. 1 по суті наведений приклад зміни структури схеми, і ми можемо засвідчити по ній всім добре відомий факт: при зміні структури схеми енергія одного контуру <u>вільно і без втрат</u> передається з одного контуру у інший контур – всупереч законам описаного Фарадеєм явища електромагнітної індукції, за яким подібне накопичення енергії замкненого контуру повинне відбуватись поступово у часі (бо нескінченно велика ЕРС не наводиться), повинне супроводжуватись наведенням ЕРС і виконанням роботи (при протіканні струму по контуру).

У 1903 р. англійський професор С. Томпсон запропонував В.Ф. Міткевичу до розгляду аналогічну по результатам роботи схему (рис. 2,а) [3, с. 84]. Через первинну обмотку трансформатора  $w_1$  рис. 2,а за допомогою джерела  $E_1$  пропускають постійний струм, який утворює постійний магнітний потік трансформатора  $\Phi_2$ . Гілка з розімкненим вимикачем  $K_2$  охоплює магнітопровід трансформатора. При увімкненому комутаторі  $K_1$  гальванометр G не пов'язаний з магнітним полем  $\Phi_2$  трансформатора.

Потім замикаємо  $K_2$  та розмикаємо  $K_1$ . Магнітне поле контура гальванометра G стрибком збільшується з нуля до магнітного поля трансформатора  $\Phi_2$ . Але згідно закону (1) ЕРС дорівнює нулю із-за відсутності процесу пересічення провідником магнітних силових ліній. Робота, еквівалентна накопиченій енергії "дарованого" магнітного поля, також не виконується.



Дослід С. Томпсона (рис. 2,а) можна легко розповсюдити на рис. 2,6, у якому один виток  $w_2 = 1$  гілки з вимикачем  $K_2$  замінюється на довільну кількість витків  $w_2$ , а гальванометр G замінюється на навантаження  $z_2$ .

Експеримент з рухомими котушками наведений на рис. 3 [3, с. 86].



Рис. 3. Експеримент з рухомими котушками w<sub>2</sub> та w<sub>3</sub>

Трансформатор рис. З має первинну w<sub>1</sub> та вторинну w<sub>2</sub> обмотки. Первинна обмотка w<sub>1</sub> увімкнена на джерело постійного струму  $E_1$ , і по ній протікає постійний струм, який створює в показаному пунктиром магнітопроводі трансформатора І постійний магнітний потік  $\Phi_2$ . Обмотки  $w_2$  та  $w_3$  ( $w_2 + w_3 = w_0 = \text{const}$ ) намотані на ізольовані рухомі котушки і можуть взаємно перемотуватись за допомогою окремих двигунів (двигуни не показані) без виконання роботи, пов'язаної зі зміною потокозчеплення. Навантаження  $z_2$  через щітки 2 та контактні кільця 3 з'єднане з послідовно увімкненими обмотками w2 та w3. Хоча потокозчеплення при перемотуванні обмоток w<sub>2</sub> та w<sub>3</sub> і змінюється, але ЕРС в них не наводиться і відповідна робота не виконується із-за відсутності перетинання провідниками магнітних силових ліній.

Схеми рис. 2 відрізняються від схеми рис. 1 тим, що нова гілка контуру з витками  $w_2$  вже охоплює створений раніше магнітний потік. Схема рис. 3 відрізняється від схем рис. 1 та рис. 2 поступовою зміною потокозчеплення обмотки  $w_2$ .

ККД контуру з джерелом "дарованої" енергії розглядається згідно класичного визначення – як відношення <u>корисної енергії</u> на навантаженні  $W_{\rm H}$  до підсумку <u>всієї енергії на вході</u>  $W_1 = W_{11} + W_{12} + W_{\rm H}^{-1}$ 

$$\eta = \frac{W_H}{W_1} = \frac{W_H}{W_{11} + W_{12} + W_H^1} \le 1$$

де  $W_{11}$  – енергія, яка витрачається на контроль та керування процесом;  $W_{12}$  – енергія, яка витрачається

при передачі підсумкової вхідної енергії  $W_1$  від входів до виходу та при переробці на корисну енергію навантаження;  $W_{\rm H}^{\ 1} = W_{\rm H}$  – частка загальної енергії  $W_1$ , яка призначена для виділення на навантаженні.

ККД <u>за визначенням</u> не може бути більше за одиницю. Але у деяких випадках невірно вважають, наприклад,  $(W_{12} + W_{\rm H}^{-1}) = 0$  (бо не витрачається енергія на їх створення) і в результаті отримують "ККД більше за 1". Насправді у цьому випадку <u>класичне визначення</u> *ККД замінюється* на <u>визначення "коефіцієнта перетворення енергії (КПЕ)</u>" [2] – відношення корисної енергії на навантаженні  $W_{\rm H}$  до енергії, <u>що витрачається на її отримання</u> (наприклад, на контроль та керування процесом  $W_{11}$ ). *КПЕ* може бути більший за 1.

Джерела "дарової" енергії відомі (гідро- та вітроелектростанції; сонячні батареї тощо), але у даному випадку ми розглядаємо потенційну електричну енергію, яка створюється з втратами енергії в одних контурах, а потім у вигляді "дару" передається в інший контур або систему.

#### АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ОБМІНУ ЕНЕРГІЇ. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянуті схеми (рис. 1-3) вказують на можливість обміну енергією з мінімальними втратами між замкненими контурами окремих систем. Їх робота характеризується наступними особливостями:

1. Час передачі "дарової" енергії може змінюватись від нуля до нескінченності.

2. Накопичення потенціальної енергії короткозамкненого контуру первинної обмотки *w*<sub>1</sub> відбувається *поступово і з втратами* на основі явища електромагнітної індукції.

3. Процес "дарування" потенціальної енергії магнітного поля може відбуватись <u>миттєво та без втрат</u> <u>енергії</u> і супроводжується або зміною топології електричної схеми, або зміною параметрів магнітного зв'язку.

4. ЕРС в контурі вторинної обмотки  $w_2$  дорівнює нулю на момент "дарової" передачі їй накопиченого обмоткою  $w_1$  магнітного потоку, бо цей магнітний потік не змінюється у часі.

5. Вторинна обмотка w<sub>2</sub> має технічні засоби дискретної чи поступової зміни параметрів магнітного зв'язку між окремими системами. Встановлений магнітний зв'язок у подальшому може використовуватись для двохстороннього обміну енергією між електромагнітними системами.

6. <u>Окремий контур може працювати за рахунок</u> <u>дарованої енергії з інших контурів</u>.

7. <u>Наведені експериментальні дані рис. 1-3 суперечать деяким теоретичним твердженням:</u> необхідності виконання еквівалентної роботи при зміні потенційної енергії замкненого контуру, або при зміні потенційної енергії ізольованої системи; неможливості зміни "стрибком" потенційної енергії замкненого контуру; існуванню зв'язку між зміною магнітного та електричного полів (магнітний потік контуру змінюється, але ЕРС дорівнює нулю); наведенню ЕРС у контурі при зміні магнітного потоку згідно закону фізики (1) та згідно рівнянню Максвелла (якщо не ураховувати вимог Фарадея, як це зроблено, наприклад, в [1]). Як приклад можливого практичного використання процесів, що розглядаються, на рис. 4 наведена схема індуктивного накопичувача енергії.



Схема складається з трьох трансформаторів з первинними обмотками  $w_1$ , по яких протікає постійний струм, що створює в магнітопроводах незмінні магнітні потоки. В результаті в вторинних обмотках  $w_2$  не створюються ЕРС. За допомогою вимикачів можна змінювати накопичений магнітний потік контуру навантаження (з опору  $z_2$  та ЕРС  $e_2$ ) шляхом його послідовного з'єднання з однією, двома або трьома вторинними обмотками  $w_2$ .

Таким чином, накопичений магнітний потік і накопичена електромагнітна енергія відповідна контуру навантаження змінюються практично без виконання еквівалентної роботи, без наведення ЕРС та без протікання струмів. Після послідовного з'єднання гілок контуру навантаження з вторинними обмотками w<sub>2</sub>, розмикання живлення первинних обмоток трансформаторів w1 призводить до виділення в гілках контуру навантаження всієї накопиченої електромагнітної енергії трансформаторів, яка має властивість дарованої енергії для розрядного контуру. Введена ЕРС  $e_2$  в схемі рис. 4 підкреслює теоретичну можливість передачі за її допомогою енергії з вториних обмоток w2 на первинні обмотки w1.

ЕРС  $e_2$  також може забезпечити рівність нулю підсумку ЕРС контуру навантаження (з опором  $z_2$  та з увімкненими послідовно обмотками  $w_2$ ) з тим, щоб цей контур був знеструмленим на момент "дарового" введення у контур магнітних потоків обмоток  $w_2$ трансформаторів (це нагадує процес увімкнення на паралельну роботу систем постійного чи змінного струмів, але описує вузьке явище – передачу енергії магнітного поля між замкненими контурами).

Можна використати й розімкнений вторинний контур, який без виконання роботи охоплює магнітне поле сторонньої системи, а потім замикається при підсумку ЕРС в контурі рівному чи не рівному нулю.

Робота напівпровідникового перетворювача енергії зі змінною топологічною структурою теж супроводжується "даровою" передачею накопиченої електромагнітної енергії, якщо новий контур вміщує гілку з створеним магнітним потоком чи гілку із зарядженим конденсатором.

Схема (рис. 5) дозволяє накопичувати енергію магнітного поля контуру навантаження (з витків  $w_3$  та опору  $z_3$ ) при перетинанні магнітних силових ліній провідниками обмотки  $w_3$  але без наведення ЕРС в контурі (згідно [3] магнітні силові лінії при зміні магнітного потоку трансформатора пересікають провідники первинної та вторинної обмоток).

Схема складається з двох трансформаторів Tp1 та Tp2 з показаними штриховими лініями магнітопроводами та первинними обмотками  $w_1$  та  $w_2$ , які створюють в магнітопроводах магнітні потоки  $\Phi_{Tp1}$  та  $\Phi_{Tp2}$  однакової величини. Для обмотки  $w_3$ , яка увімкнена на навантаження  $z_3$ , спрямованість однакових магнітних потоків  $\Phi_{Tp1}$  та  $\Phi_{Tp2}$  є протилежною. Магнітні поля  $\Phi_{Tp1}$  та  $\Phi_{Tp2}$  можна змінювати таким чином, що результуюче магнітне поле обмотки  $w_3$  буде дорівнювати нулю  $\Phi_{w3} = \Phi_{Tp1} - \Phi_{Tp2} = 0$ .

Згідно виразу (3) обмотка  $w_3$  не має результуючого магнітного поля ( $\Phi_{w3} = \Phi_{Tp1} - \Phi_{Tp2} = 0$ ) і згідно того ж виразу (3) вона має магнітне поле  $\Phi_{Tp1}$  в одній частині площі контуру та магнітне поле протилежного спрямування  $\Phi_{Tp2}$  в іншій частині площі контуру. І накопичена енергія двох магнітних полів  $\Phi_{Tp1}$  та  $\Phi_{Tp2}$ може бути використана в навантаженні  $z_3$ .

Приклад рис. 5 можна розглянути у більш широкому сенсі, коли нерухомий контур  $w_3$  охоплює N магнітопроводів трансформаторів типу Tp1 та Tp2. Цей випадок можна описати формулами

$$\Phi_K = \sum_{j=1}^N \Phi_j = 0; \quad \Phi_j \neq 0, \tag{4}$$

де *j* = 1...*N* – порядковий номер трансформатора.

При нескінченній кількості спрямованих назустріч магнітних силових ліній ( $N=\infty$ ) згідно (4) ми отримуємо симетричний "<u>квазінемагнітний простір</u>", насичений магнітними силовими лініями протилежного спрямування, у якому магнітне поле "не існує", бо цей простір нічим не відрізняється від звичайного навколишнього середовища без магнітного поля, хоча з нього принаймні теоретично не заборонено черпати енергію. <u>На даний час цей "квазінемагнітний простір" цікавий лише з теоретичної точки зору</u>, бо немає жодних теоретичних або практичних підстав для твердження, що навколишнє середовище є саме таким простором, і його можна використати, як невичерпне джерело енергії, чи як джерело, у якому її можна накопичувати.

Аналіз розглянутих схем. Схеми на рис. 1, рис. 2, рис. 3 (якщо на час перемотки витків магнітний потік не змінюється), рис. 4; схеми циклічного заряду та розряду конденсатора та схеми напівпровідникових перетворювачів енергії можна розглядати <u>як схеми зі</u> змінною структурою. Таким чином, явище миттєвої передачі потенційної енергії між електричними контурами зв'язане лише зі зміною структури схеми.

Схема на рис. 5 може аналізуватись, як схема незмінної топології з наведенням у контурі навантаження двох протилежно спрямованих ЕРС.

З наведених математичних моделей (1) – (4) та даних роботи схем рис. 1-5 випливає, що процес зміни накопиченої потенційної електромагнітної енергії замкненого контуру може відбуватись на основі <u>двох</u> взаємно несумісних фізичних явищ:

1. *Явища електромагнітної індукції, яке описане Фарадеєм* і у якому процеси розраховуються на основі математичних моделей (1) – (3). Процес накопичення електромагнітної енергії замкненого контуру супроводжується наведенням у замкненому контурі ЕРС та виконанням роботи (у випадку протікання струму у контурі). <u>Умови Фарадея стосовно виник-</u> нення явища електромагнітної індукції мають вигляд:

1.1. Явище супроводжується перетинанням провідниками замкненого контуру безперервних магнітних силових ліній з наведенням ЕРС.

1.2. При аналізі процесів у реальному об'єкті обмеженість величини індуктора у просторі накладає відповідні умови на межі інтегрування зміни магнітного поля контуру у просторі та часі.

1.3. Зміна накопиченої електромагнітної енергії замкненого контуру відбувається поступово у часі. Миттєва зміна енергії магнітного поля замкненого контуру неможлива із-за наведення великої ЕРС, а миттєва зміна енергії зарядженого конденсатору вимагає використання джерела енергії нескінченно великої потужності, що теж є нереальним.

2. <u>Явища миттєвого обміну накопиченою потенційною електромагнітною енергією між замкненими контурами електромагнітних систем</u>, яке супроводжується наступними умовами виникнення:

2.1. Явище відбувається при зміні структури схеми і вимагає наявності контурів (або систем) з накопиченою енергією у електричних та магнітних полях. При зміні структури схеми вказана енергія без зміни її величини автоматично і миттєво передається з одного контуру у інший без виконання еквівалентної роботи.

2.2. Явище не супроводжується перетинанням провідниками замкненого контуру безперервних магнітних силових ліній та наведенням ЕРС.

2.3. Повинна бути забезпечена технічна можливість встановлення і розриву зв'язку між окремими контурами, наприклад: перемиканням вимикачів чи напівпровідникових приладів, перемотуванням витків котушок.

З опису цих двох явищ можна зробити висновок, що основною відміною явища "дарованої" передачі накопиченої електромагнітної енергії від явища електромагнітної індукції є теоретична можливість <u>мит-</u> <u>тєвої передачі</u> накопиченої потенційної електромагнітної енергії між окремими контурами або системами.

Дослідник сам повинен визначити, до якого з цих двох явищ відносяться процеси, які спостерігаються в досліджуваній схемі.

Згідно наведених даних:

• формули Фарадея та Максвелла для розрахунку ЕРС не можна протиставляти, як це зроблено в [3], бо вони є тотожними і описують однакові явища при однакових лінгвістичних обмеженнях Фарадея. Максвелл, за його власним висловом, "лише одягнув у математичні одежі теорію Фарадея", і, отже, визнавав всі його теоретичні положення;

• також не можна протиставляти, як це зроблено в [3], дані експериментів рис. 1-3 закону електромагнітної індукції Фарадея, бо вони описують різні явища, які відбуваються при різних, взаємно несумісних, умовах.

#### ВИСНОВКИ

1. Явище електромагнітної індукції, описане Фарадеєм, відрізняється від явища миттєвої передачі потенційної енергії між електричними контурами та системами перетинанням провідниками контуру магнітних силових ліній, наведенням ЕРС у контурі при зміні магнітного потоку, поступовим нарощуванням енергії магнітного та електричного полів в контурах електричної системи.

Закон електромагнітної індукції Фарадея встановлює зв'язок між зміною у часі магнітного потоку замкненого контуру та ЕРС, що є електричним полем, під дією якого рухаються електричні заряди. В фаховій літературі підкреслюється існування нерозривного зв'язку між магнітним та електричним полем. Експериментальні дані рис. 1-3 показують, що у дійсності зв'язок між магнітним та електричними полями існує лише при умові пересічення провідниками контуру магнітних силових ліній. а без полібного пересічення цей зв'язок порушується, і зміна магнітного потоку контуру не викликає виникнення ЕРС.

2. Для сукупності окремих не зв'язаних між собою електромагнітних систем існує теоретична можливість миттєвої передачі потенційної енергії між ними "без її втрат та без виконання роботи". Тому окрема система може працювати за рахунок використання дарової енергії, отриманої від сторонніх електромагнітних систем.

3. Для сукупності електромагнітних систем передана енергія не є даровою, бо накопичення та передача енергії відбувається з відповідними втратами енергії.

4. Математичні моделі фізичних явищ, які супроводжуються зміною величини магнітного потоку замкненого контуру у часі чи по координаті повинні ураховувати лінгвістичні умови, які є невід'ємною часткою їх існування.

5. Отриманий симетричний "квазінемагнітний простір" може розглядатись лише з теоретичного боку, бо з нього теоретично не заборонено черпати дарову енергію. Але немає жодних теоретичних чи практичних підстав для твердження, що навколишнє немагнітне середовище є "квазінемагнітним простором" і що існує можливість його використання або як невичерпного джерела енергії, або як керованого накопичувача енергії, що може поповнюватись.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дмітрієва В.Ф. Фізика: Навчальний посібник. – К.: Техніка, 2008. – 648 с.

2. Козлов С.В.. Может ли КПД быть больше единицы? Електронний pecypc http://www.ecoteplo.ru/mozhet-li-kpd/.

3. Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразования. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1946. – 258 с.

4. Парсел Э. Электричество и магнетизм. - М.: Наука, 1975. – 440 c.

REFERENCES: 1. Dmitrieva V.F. Fizyka: Navchal'nyy posibnyk [Physics: Tutorial]. Kyiv, Tehnika Publ., 2008. 648 p. 2. Kozlov S.V. Mozhet li KPD byt' bol'she edinitsy? (Can efficiency be greater than one?) Available at: http://www.ecoteplo.ru/mozhet-li-kpd/ (accessed 13 January 2014). 3. Mitkevich V.F. Magnitniy potok i ego preobrazovaniya [Magnetic flux and its conversion]. Moscow-Leningrad, Acad. of Sci. USSR Publ., 1946. 258 p. 4. Parcel E. Electrichestvo i magnetism [Electricity and Magnetism]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 440 p.

#### Надійшла (received) 15.02.2014

Кутковецький Валентин Якович, д.т.н., проф., Чорноморський державний університет їм. Петра Могили, 54003, Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10, тел/phone +38 0512 366578, e-mail: kb@kma.mk.ua

#### V.J. Kutkovetskvv

Petro Mohyla Black Sea State University 10, 68-Desantnykiv Street, Mykolaiv, 54003, Ukraine The phenomenon of instant potential energy transmission

#### between electrical circuits and networks.

Transmission of accumulated potential electromagnetic energy between closed circuits can be performed instantly without both its value variation and the equivalent work execution. As a result, a closed circuit or a separated system can obtain free energy from other circuits or systems.

Kev words – phenomenon, potential electromagnetic energy transmission, Faraday, Maxwell, Kirchhoff.

УДК 621.318.4

Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин, С.А. Шиндерук

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ ПРИ ВВЕДЕНИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВИТКА

Стаття присвячена експериментальному дослідженню впливу додаткового кругового витка, введеного у внутрішню область індукторної системи з екраном, що притягає на розподіл індукованих струмів, а також визначення коефіцієнта трансформації струму у обмотці соленоїда.

Статья посвящена экспериментальному исследованию влияния дополнительного кругового витка, введенного во внутреннюю область индукторной системы с притягивающим экраном, на распределение индуцированных токов в заготовке, а также определению коэффициента трансформации тока в обмотке соленоида.

Постановка проблемы. Магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) в настоящее время получает все большее распространение в металлообрабатываюшей промышленности [1]. Кроме классического применения, МИОМ получает распространение в отраслях, которые до недавнего времени использовали классические инструменты для выполнения необходимых производственных операций. К таким операциям относятся магнитно-импульсная рихтовка корпусов самолетов компании Boeing, Electroimpackt, Fluxtronic, а также магнитно-импульсная рихтовка кузовов автомобилей фирмы Beulentechnik AG [2]. На современном этапе технического развития практическое использование энергии импульсных электромагнитных полей открывает большие перспективы для создания и внедрения прогрессивных технологий. Особый интерес представляют системы и устройства, повышающие эффективность работы существующих и создание принципиально новых инструментов для МИОМ [1, 2].

Анализ основных достижений и публикаций. Способ магнитно-импульсного притяжения металлических объектов двухвитковой круговой индукторной системой с тонким экраном предложенный авторами работы [3], представляет интерес для практического исследования процессов проходящих в данных системах. Первоначальное авторское название – индукционно индукторная система (ИИС). В дальнейшем инструменты данного типа получили название – индукторные системы с притягивающим экраном (ИСПЭ).

Теоретическому анализу электромагнитных процессов в индукторных системах с притягивающим экраном посвящены работы [4-5]. В них классическим методом выполнено аналитическое решение соответствующих электродинамических задач, проведены численные оценки, построены наглядные графические зависимости, иллюстрирующие влияние экранов различной физической природы на распределение возбуждаемых полей и токов.

Однако любые теоретические исследования должны апробироваться на предмет адекватности описываемым процессам. Достоверность полученных результатов устанавливается измерениями основных характеристик исследуемых явлений.

Цель работы – измерение пространственного распределения индуцированных токов и коэффициента трансформации энергии в ИСПЭ при введении в конструкцию дополнительного витка с внешней стороны вспомогательного экрана.

Оборудование. Перечень оборудования в проведенных экспериментах включает следующее:

1. Источник мощности в модельных экспериментах – низковольтный генератор токовых импульсов [7] (поз. 1 на рис. 1).

2. Силовой источник мощности – магнитноимпульсная установка МИУС-2 с запасаемой энергией до ~2 кДж и максимумом напряжения ~2000 В [8].

3. Модельные варианты "индукторной системы с притягивающим экраном" (ИСПЭ) представленный на рис. 2,а.

4. Согласующие устройства, обеспечивающие реализацию низкочастотного режима до ~1,8...2 кГц (рис. 2,б).

5. Образцы листовой немагнитной стали с одинаковой толщиной ~1 мм (рис. 2,в).



Рис. 1. Комплекс для проведения модельных экспериментов: 1 – низковольтный генератор токовых импульсов, 2 – осциллограф, 3 – компьютер

Модельные измерения. Реализация поставленной цели предполагает следующие измерения:

• распределение индуцированных токов;

• коэффициент трансформации тока непосредственно в обмотке соленоидов – К, количественно определяющий уровень передачи энергии в обмотку ИСПЭ.

Распределение индуцированных токов формирует представление о характере распределения возбуждаемых сил притяжения, а их амплитуды устанавливаются величиной коэффициента – К.

Эксперименты осуществлялись при различных вариантах электрического подключения 2-х возбуж-



Рис. 2. Объект экспериментальных исследований: а - "индукторная система с притягивающим экраном" (со стороны внутреннего витка в пазу на плоскости экрана), б – согласующее устройство (внизу) с подключённой ИСПЭ (вверху), в - листовая немагнитная сталь с выводами для измерения распределения плотности индуцированного тока

дающих соленоидов ("включён - выключен", "выключен – включён", "оба включены").

Для получения максимальной эффективности запланированных измерений выбраны два конструктивных исполнения образцов возбуждающих соленоидов: начальные измерения проводились при подключении внешнего соленоида представленного одним круговым витком (рис. 3,а), а завершающие – при подключении внешнего соленоида представленного 4-мя параллельными ветвями (рис. 3,б).



Рис. 3. Образцы возбуждающих соленоидов: а - одновитковый круговой соленоид, б – круговой соленоид из 4-х параллельных витков

Распределение индуцированных токов. Для определения характера влияния дополнительного источника поля на радиальное распределение индуцированных токов достаточно ограничиться измерениями лишь в одном из элементов притяжения ИСПЭ, например, в металле листовой заготовки.

Экспериментальные результаты проведенных измерений представлены на графиках рис. 4.

Результаты измерений на графике рис. 4 показывают, что подключение дополнительного соленоида с внешней стороны вспомогательного экрана позволяет сформировать более равномерное пространственное распределение индуцированных токов и, как следствие, более равномерное пространственное распределение возбуждаемых сил притяжения.



Рис. 4. Радиальные распределения относительной плотности индуцированного тока в листовой заготовке (нормировка на максимум): 1 - "основной индуктор - включён, дополнительный индуктор – отключён", 2 – "основной и дополнительный индукторы - включены"

Иллюстрацией позитивного влияния дополнительного соленоида на характер протекающих электромагнитных процессов являются также расчётные зависимости на рис. 5, полученные аналогично работе [2].



Рис. 5. Расчётные зависимости радиальных распределений линейной плотности индуцированного тока в металле листовой заготовки (в относительных единицах, нормировка на максимум): 1 – "основной индуктор включён, дополнительный индуктор - отключён",

2 - "основной и дополнительный индукторы - включены"

Хотелось бы отметить, что при введении дополнительного витка "выравнивание" пространственного распределения индуцированного тока в листовой заготовке сопровождалось снижением его амплитуды на ~35 %. Отмеченное обстоятельство становится понятным, если учесть, что дополнительный виток экранировался металлом вспомогательного экрана. Как следствие, ослаблялось суммарное магнитное поле, возбуждаемое двумя витками, по сравнению с включением только одного из них - основного индуктора.

Коэффициент трансформации тока в обмотки соленоидов. Измерение "коэффициента трансформации в обмотки соленоидов" позволяет оценить амплитуды возбуждаемых сил притяжения в соответствии с уровнем энергии, передаваемой непосредственно в ИСПЭ.

Пояснения по поводу последнего утверждения можно дать с помощью схемы на рис. 6.

Как было ранее указано, исследуемая индукторная система подключается к согласующему устройству (СУ), обеспечивающему требуемый низкочастотный режим возбуждения и повышение амплитуд действующих магнитных полей. Конструкция согласующего устройства, работающего по принципу действия

повышающего трансформатора тока, предполагает различные варианты замкнутых контуров для протекания вторичных (индуцированных) токов. Например, это контуры (1-2) и (2-3) на рис. 6, в соответствии с которыми возбуждаемые вихревые токи частично замыкаются собственно во вторичной обмотке (контур (1-2)) и частично протекают в рабочей обмотке ИСПЭ (контур (2-3)). Очевидно, что эффективность её действенности тем выше, чем выше уровень передачи энергии и, соответственно, большая часть индуцированных токов попадает в рабочую обмотку инструмента.



Рис. 6. Возможные контуры протекания вихревых токов, индуцированных во вторичной обмотке согласующего устройства (диск с радиальным разрезом): (1-2), (2-3)

Количественно, данный фактор можно зафиксировать вышеуказанным "коэффициентом трансформации в обмотку ИСПЭ" – **K**, определяемым как отношение амплитуды тока на входе в обмотку ИСПЭ (выход вторичной обмотки согласующего устройства) –  $J_{\rm ИСПЭ}$  к амплитуде тока на входе в первичную обмотку согласующего устройства –  $J_{\rm BX}$ , то есть, **K** =  $J_{\rm ИСПЭ}/J_{\rm BX}$ .

Источник мощности – магнитно-импульсная установка МИУС-2 в режиме с пониженным напряжением U = 450 В, "характерной" рабочей частотой  $f \approx 2000$  Гц, относительным декрементом затухания  $\delta_0 \approx 0.3$ . Амплитуда тока на входе согласующего устройства ~ $J_{\rm BX} \approx 3600...4800$  А.

Рис. 7 иллюстрирует проведенные измерения исследованных индукторных систем, а именно – типичные осциллограммы токовых импульсов.



Результаты измерений при различных вариантах включения и конструкциях возбуждающих индукторов в исследуемой ИСПЭ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты н	измерений		
Возбуждающие индукторы	Вход СУ,	Вход ИСПЭ,	К
Возоўждающне нідукторы	$J_{\rm BX}, {\rm A}$	<i>J</i> <sub>ИСПЭ</sub> , А	n
Основной	4678,1	14095,8	3,01
Одновитковый	2656.0	10156.0	2 70
дополнительный	3030,9	10130,9	2,70
Основной и одновитковый	1160.1	12000	2 01
дополнительный	4409,4	13000	2,91
Основной и дополнительный			
круговой соленоид из 4-х	4504,5	18075,2	4,01
параллельных ветвей			

Из данных табл. 1 следует, что дополнительный одновитковый индуктор, практически, не влияет на коэффициент трансформации. Отклонение его величины от наибольшего значения не превышает ~8 %.

Введение в схему ИСПЭ дополнительного кругового соленоида из 4-х параллельных ветвей приводит к повышению уровня энергии, трансформируемой в обмотку, на ~25 %. Физически, данное обстоятельство объясняется достаточно значимым уменьшением полного сопротивления обмотки ИСПЭ, представленной несколькими параллельными ветвями, в сравнении с возможными путями замыкания индуцированного тока в металле вторичной обмотки СУ.

Проведя оценку видно, что при **K**  $\approx$  4 в обмотке ИСПЭ при напряжении на емкостном накопителе U = 1800 В, C = 1200 мкФ, частоте  $f \approx 2000$  Гц и относительном декременте  $\delta \approx 0,3$  в обмотке ИСПЭ можно получить ток с амплитудой ~ $J_{ИСПЭ} \approx 67770$  А.

#### Выводы.

1. Подключение дополнительного соленоида с внешней стороны вспомогательного экрана в "индукторной системе с притягивающим экраном" позволяет сформировать более равномерное распределение индуцированных токов и, как следствие, более равномерное пространственное распределение возбуждаемых сил притяжения. Очевидно, данный эффект является результатом суперпозиции двух пространственно разнесенных источников магнитного поля.

2. Введение дополнительного витка сопровождалось снижением амплитуды индуцированного тока. Это обстоятельство обусловлено экранированием части возбуждаемого магнитного поля металлом вспомогательного экрана.

3. Конструкция дополнительного источника магнитного поля с внешней стороны вспомогательного экрана существенно влияет на величину коэффициента трансформации тока в ИСПЭ. Выполнение его в виде кругового соленоида из 4-х параллельных ветвей позволяет увеличить уровень энергии, трансформируемой в обмотку инструмента притяжения, на ~25 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.1. под ред. проф. Батыгина Ю.В. [2-е изд.]. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.

2. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.З. Теория

и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.

3. Пат. 70734 Україна, МПК В 21 D 26/14 Спосіб магнітноімпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою круговою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Щіголева С.О., Чаплигін Є.О., Гопко А.В., Дробінін О.М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201114018; заявл. 28.11.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

4. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Сериков Г.С. Расчет усилий в индукционной индукторной системе прямоугольной геометрии с неферромагнитным массивным экраном и заготовкой // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №3. – С. 61-64.

5. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с неферромагнитным массивным экраном и листовой заготовкой // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №4. – С. 56-59.

6. Гнатов А.В. Расчет электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с массивным экраном конечной толщины // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №5. – С. 59-62.

7. Бондаренко А.Ю., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 66-69.

8. Пат. 73733 Україна, МПК В 21 D 26/14 Генератор багаторазових уніполярних імпульсів струму для магнітноімпульсної обробки металів / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Чаплигін Є.О., Дзюбенко О.А., Аргун Щ.В., Дробінін О.М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201202178; заявл. 24.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.

**REFERENCES:** *1.* Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Himenko L.T. *Impulsnyie magnitnyie polya dlya progressivnyih tehnologiy. Tom 1* [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Vol.1]. Kharkov, MOST-Tornado Publ., 2003. 288 p. *2.* Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impulsnyie magnitnyie polya dlya progressivnyih tehnologiy. Tom 3. Teoriia i eksperiment pritiazheniia tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi poliami* [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Vol.3. Theory and experiment of thinwalled metals attraction by the pulse magnetic fields]. Kharkov, KhNAHU Publ., 2009. 240 p. *3.* Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Y.A., Gopko A.V., Shigoleva S.A., Drobinin A.M. *Sposib magnitno*- impul'snogo prytjagannja metalevyh ob'jektiv dvovytkovoju krugovoju induktornoju systemoju z tonkym ekranom [The method of magneticpulse attraction of metal objects by double-turn circular inductor system with a thin screen]. Patent UA, no.70734, 2012. 4. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Serikov G.S. Calculation of forces in a rectangular-geometry induction inductor system with a non-ferromagnetic massive screen and a work-piece. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2009, no.3, pp. 61-64. 5. Batygin Yu.V., Gnatov A.V. Calculation of electrodynamic forces in an induction inductor system with a non-ferromagnetic massive screen and a sheet work-piece. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2009, no.4, pp. 56-59. 6. Gnatov A.V. Calculation of electromagnetic processes in an induction inductor system with a massive screen of finite thickness. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2009, no.5, pp. 59-62. 7. Bondarenko A.Yu., Serikov G.S., Chaplygin Y.A. A low-voltage current pulse generator with a wide frequency range for physical simulation. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2007, no.6, pp. 66-69. 8. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Argun Sh.V., Chaplygin Y.A., Dzubenko A.A., Drobinin A.M. Generator bagatorazovyh unipoljarnyh impul'siv strumu dlja magnitno-impul'snoi' obrobky metaliv [The generator of multiple unipolar current pulses for magnetic-pulse metal working]. Patent UA, no.73733, 2012.

#### Поступила (received) 14.04.2014

Батыгин Юрий Викторович<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Чаплыгин Евгений Александрович<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, Шиндерук Светлана Александровна<sup>1</sup>, аспирант, <sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

61002, Харьков, ул. Петровского, 25,

тел/phone +38 057 7073653, e-mail: batygin48@mail.ru; chaplygin\_e\_a@mail.ru; svetlana11177@rambler.ru

*Yu.V. Batygin*<sup>1</sup>, *E.A. Chaplygin*<sup>1</sup>, *S.A. Shinderuk*<sup>1</sup> <sup>1</sup>Kharkov National Automobile and Highway University 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine

Experimental study of processes in an attractive-screen inductor system under additional coil insertion.

The article is devoted to experimental investigations of action of an additional coil inserted inside an inductor system with an attractive screen on induced current distribution in the workpiece and to determination of the coefficient of the solenoid winding current transformation.

*Key words* – inductor system, additional coil, attractive screen, inductor, electromagnetic process.

А.В. Беспрозванных, А.Н. Бойко

## КОНТАКТНАЯ РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ – КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СТЕПЕНИ СТАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Показана динаміка зміни контактної різниці потенціалів силових кабелів зі зшитою поліетиленовою ізоляцією в початковому стані та після додаткового терморадіаційного старіння. Запропоновано проводити заземлення металевих елементів кабелю перед початком вимірювань для зменшення ступеню впливу поверхневих зарядів. Експериментально встановлено, що контактна різниця потенціалів є чутливим показником до процесів старіння (окислення) полімерної ізоляції.

Показана динамика изменения контактной разности потенциалов силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией в исходном состоянии и после дополнительного терморадиационного старения. Предложено проводить заземление металлических элементов кабеля перед измерениями для уменьшения степени влияния поверхностных зарядов. Экспериментально установлено, что контактная разность потенциалов является чувствительным показателем к процессам старения (окисления) полимерной изоляции.

#### ВВЕДЕНИЕ

В полимерной изоляции наблюдаются медленные процессы, связанные, в частности, с трибоэлектризацией и генерацией трибопотенциала.

Трибоэлектрические эффекты влияют на диффузию продуктов деструкции полимеров, структурнофазовые превращения.

Трение с молекулярной точки зрения – это процесс, заключающийся в преодолении адгезионных связей, возникающих при фактическом контакте двух поверхностей, и объемном деформировании неровностями истирающей поверхности тонкого поверхностного слоя истираемой, например, полимерной поверхности [1].

Взаимодействие твердых тел при физических и электрических процессах, развивающихся в зоне трения, можно оценить только с учетом микрогеометрии контактирующих поверхностей. Вследствие шероховатости и волнистости поверхностей твердых тел трение возникает лишь на отдельных участках касания (фрикционных контактах). Фактическая площадь контакта - это площадь, на которой осуществляется контакт микронеровностей, образующих шероховатость поверхностей. Ее величина составляет 0,01-0,1 % от номинальной площади. Размеры неровностей обычно не превышают 3-50 мкм. Фактическое давление на контактах весьма велико, а это приводит к пластической деформации выступов и к "пропахиванию" неровностями поверхностного слоя контактирующих материалов.

Конструктивной и технологической особенностью силовых, радиочастотных коаксиальных, кабелей на основе витых пар является плотное наложение полимерной изоляции на токопроводящую жилу. Такое исполнение обеспечивает отсутствие воздушных включений между жилой и изоляцией, что особенно важно для силовых кабелей; более жесткую конструкцию, а значит и стабильность электрических параметров передачи информационных кабелей. Наличие постоянного контакта (трения) токопроводящих жил относительно полимерной изоляции по всей длине кабеля приводит к накоплению и переносу (стеканию) свободных трибозарядов, т.е. наблюдается процесс статической электризации.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Любая трибосистема в неподвижном состоянии практически равновесна, т.е. материал трибопары сохраняет своё состояние без значительных изменений продолжительное время. Обмен трибозарядами и их переходы происходят в динамическом равновесии, поэтому процессы деструкции протекают весьма медленно. При электрических, тепловых и механических воздействиях в поверхностном слое процесс выхода зарядов протекает интенсивно, так как постоянно разрушается точечное электрическое контактное взаимодействие и равновесие, исключающее равновесный обмен зарядами между контактирующими материалами. Заряды из объёма материала с меньшей работой выхода переходят на поверхность материала с большей работой выхода [2]. На границах раздела контактирующих поверхностей возникает скачок потенциала – контактная разность потенциала, образование двойного электрического слоя и, как результат, появление дополнительной емкости  $\Delta C$  и диэлектрических потерь [2-5]. Величина контактной разности потенциалов и дополнительной емкости зависят от трибологических свойств контактирующих материалов. Так, полиэтиленовая изоляция обладает высокими трибоэлектрическими свойствами (неполярный высококачественный диэлектрик), поливинилхлоридная изоляция (полярный диэлектрик, электрические свойства которого хуже по сравнению с полиэтиленом) менее выраженными.

Процесс старения полимерной изоляции начинается, прежде всего, с изменения состояния ее поверхности в силу окисления, т.е. наблюдается изменение шероховатости. Размеры неровностей увеличиваются. Очевидно, что контактная разность потенциалов должна изменяться в процессе старения изоляции. Вместе с тем, и диэлектрические параметры (емкость и тангенс угла диэлектрических потерь) также должны изменяться [6, 7].

Цель статьи – на основе динамики изменений в процессе ускоренного терморадиационного старения образов силовых кабелей показать возможности контактной разности потенциалов в качестве показателя степени старения полимерной изоляции.

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ СТЕКАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЗАРЯДОВ

Стекание поверхностных зарядов - процесс непрерывный и определяется электропроводностью диэлектрика и эмиссией заряда с поверхности в свободное пространство кабеля. Считается, что значения  $\rho_V = 10^{10}$  Ом м и  $\rho_S = 10^{12}$  Ом являются граничными, выше которых материал статически электризуется, а ниже - не электризуется. Это соответствует значениям постоянной времени т около 1 с, т.е. заряд, возникший на поверхности полимера, за одну секунду снижается в 2,7 раза, а за 2 секунды – примерно в 10 раз. Если  $\rho_V \le 10^4 \text{Ом} \cdot \text{м}$  – вещество практически не электризуется [для полиэтиленовой изоляции  $\rho_V = 10^{15}$ Ом·м, для поливинилхлоридной (ПВХ) изоляции - $\rho_V = (10^{11} - 10^{12}) \text{ Ом·м]}.$  Так как полимерная изоляция имеет дефекты, связанные как с наличием примесей, так и с неоднородностью структуры, то это обуславливает возможность стекания статического заряда за счёт объемной проводимости.

Скорость стекания зарядов, таким образом, определяется удельным объёмным  $\rho_V$  и удельным поверхностным  $\rho_S$  сопротивлением полимерной изоляции. Поверхностная проводимость (обратная поверхностному сопротивлению) зависит от химического состава, содержания примесей, низкомолекулярных продуктов, в том числе и влаги, характера и состояния поверхности: гладкой в исходном состоянии и шероховатой (окисленной) после старения. Поверхностные свободные заряды полимерной изоляции в значительной степени определяют способность к нейтрализации трибозарядов.

Изменение во времени t поверхностной плотности заряда  $\sigma(t)$  и скорость стекания – постоянная времени ( $\tau$ ), характеризующая время уменьшения заряда в 2,7 раз, определяются как

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right),$$
  
$$\tau = RC,$$
  
$$R = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s}; \quad C = \frac{C_1 + \Delta C}{C_1 \cdot \Delta C},$$

где  $\sigma_0$  — максимальное значение поверхностной плотности заряда (для полимерных диэлектриков поверхностная плотность заряда находится в диапазоне от 500 пКл/м<sup>2</sup> до 300 нКл/м<sup>2</sup>; R — сопротивление изоляции, Ом·м, определяемое полным объемным  $R_v$  и полным поверхностным сопротивлением  $R_s$ ; C — погонная ёмкость кабеля — между жилой и металлическим экраном,  $\Phi/м$ :  $C_I$  — геометрическая и  $\Delta C$  — дополнительная емкость, обусловленная процессом трибоэлектризации.

Таким образом, постоянная времени зависит от диэлектрических свойств самой изоляции ( $\rho_V$ ,  $\rho_S$ , относительной диэлектрической проницаемости материала изоляции  $\epsilon$ ), трибологических свойств и состояния ее поверхности, а также свойств контактирующего с изоляцией элемента.

Значения поверхностного электростатического заряда быстро снижаются, если  $t > \tau$ , и медленно изменяются во времени, если  $t < \tau$ .

На рис. 1 приведены результаты измерения сопротивления изоляции в зависимости от приложенного постоянного напряжения образца одножильного силового кабеля с вулканизированной полиэтиленовой изоляцией в исходном состоянии (до старения). Кривая 1 соответствует измерениям, выполненным без предварительного стекания заряда, кривые 2, 3 и 4 – со стеканием при разных временах выдержки образца: кривые 2 и 3 – с интервалом в 80 мин каждая, кривая 4 – в течение 10 дней при заземленной жиле и металлического экрана.

В первом случае (кривая 1) наблюдается "кажущееся" увеличение сопротивления изоляции с ростом приложенного напряжения, что связано с влиянием поверхностного заряда. При продолжительном стекании заряда (кривая 4) влияние поверхностных свободных зарядов уменьшено: зависимость сопротивления изоляции с ростом приложенного напряжения имеет падающий характер. Это подтверждается также результатами измерений контактной разности потенциалов (рис. 2) до стекания (кривая 1) и после стекания (кривая 2) зарядов в образце кабеля.



Для поливинилхлоридной изоляции без предварительного стекания зарядов зависимость сопротивления изоляции от величины приложенного напряжения носит падающий характер (рис. 1, кривая 3).

Таким образом, влияние поверхностных зарядов, обусловленных электропроводностью полимерной изоляции, на результаты измерений контактной разности потенциалов можно уменьшить. Для этого перед измерением необходимо провести разрядку кабеля (заземлить жилы и металлическую оболочку) на время t большее, чем постоянная времени  $\tau$ .

#### ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЙ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ СТАРЕНИЯ

На рис. 3 показано изменение контактной разности потенциалов в исходном состоянии (кривая 1) и после ускоренного терморадиационного старения (кривая 2) образца одножильного силового кабеля сечением 240 мм<sup>2</sup> с полупроводящими экранами по жиле и изоляции со сшитой полиэтиленовой изоляцией на напряжение 6 кВ.



Сравнение кривых 1 и 2 (рис. 3,а и рис. 3,б) показывает, что после старения наблюдается значимое увеличение (в три раза) максимального значения U<sub>k</sub> и смещение момента достижения максимума в сторону меньших времен (направление изменения показано стрелкой на рис. 3,б). Причем, в области больших времен наблюдения (рис. 3,а) кривая 2 приближаются к нулевым значениям [8]. Для кривой 1 такая тенденция не наблюдается. Это является косвенным подтверждением, что после старения концентрация "ловушек" на поверхности шероховатой окисленной поверхности полиэтиленовой изоляции возрастает и трибозаряды захватываются такими "ловушками". С данными результатами согласуются временные ряды измеренных значений емкости (рис. 4, кривая 1 и кривая 2) и тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 5, кривые 1 и 2 соответственно): после старения (кривые 2) наблюдается больший размах результатов измерений.

Характер временных зависимостей контактной разности потенциалов силовых кабелей определяется конструктивными особенностями и применяемыми материалами. Так, для 4-х жильного кабеля с вулканизированной изоляцией без полупроводящих экранов по жиле и изоляции на напряжение 1 кВ для рядом расположенных жил динамика изменения контактной разности потенциалов в исходном состоянии



(кривая 1) и после старения (кривая 2) представлена на рис. 6. Сравнение характера зависимости контактной разности потенциалов в образцах кабелей с полупроводящими экранами (рис. 3) и без (рис. 6) показывает, что полупроводящие экраны в конструкции кабелей изменяют трибологические свойства сшитой полиэтиленовой изоляции. После старения в одинаковых условиях и при одних и тех же режимах (температуре и дозе радиации) более окисленной является полиэтиленовая изоляция без защитного полупроводящего экрана: шероховатости окисленной поверхности отчетливо наблюдаются с помощью микроскопа. Это подтверждается и результатами измерений емкости (рис. 7,а) и тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 120 Гц (рис. 7,б) и 1 кГц (рис. 7,в). На частоте 1 кГц разброс значений потерь уменьшился, что косвенно подтверждает факт осаждения поверхностных зарядов на окисленной поверхности полиэтиленовой изоляции.

Для промежуточной защитной оболочки на основе поливинилхлоридного пластиката одножильного силового кабеля также наблюдается значимое увеличение контактной разности потенциалов в ходе ускоренного терморадиационного старения (рис. 8: кривая 1 – исходное состояние, кривая 2 – после старения).





Увеличение емкости (рис. 9,а) после старения связано с процессом окисления поверхности изоляции. Эти результаты находятся в прямой зависимости с результатами измерения тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 1 кГц (рис. 9,в): существенный, в 1,4 раза, рост является подтверждением старения ПВХ-оболочки, т.е. ее окисления. Потери на частоте 120 Гц не изменились (рис. 9,б): кривые 1 и 2 – совпадают.



Наблюдается качественное различие временных рядов емкости и тангенса угла диэлектрических потерь для полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляции (сравни рис 4, 5, 7 и 9). Разброс экспериментальных данных диэлектрических параметров меньше в случае ПВХ-изоляции, что связано с менее выраженными трибологическими свойствами ПВХпластиката.

#### выводы

Экспериментально показано, что контактная разность потенциалов является чувствительным параметром и может быть использована в качестве показателя состояния поверхности полимерной изоляции.

Для уменьшения влияния поверхностных свободных зарядов на результаты измерений перед началом измерений необходимо в течение времени, соизмеримого с постоянной времени, произвести разрядку кабеля (жилу и металлическую оболочку – заземлить).

В процессе старения окисленная поверхность полимерной изоляции способна в большей степени "захватить" ("связать") трибозаряды, что приводит, в зависимости от конструкции кабеля и применяемых материалов, к заметному изменению характера зависимости во времени контактной разности потенциалов. Для более окисленной поверхности полимерной изоляции характерен меньший разброс контактной разности потенциалов (в случае полиэтиленовой изоляции без полупроводящих экранов) либо сдвиг максимума в область меньших времен (для полиэтиленовой изоляции с полупроводящими экранами).

В кабелях с вулканизированной полиэтиленовой изоляцией и полупроводящими экранами по жиле и изоляции косвенно, по результатам измерения контактной разности потенциалов, установлено, что саженаполненные полупроводящие экраны замедляют процесс окисления полиэтиленовой изоляции.

Для промежуточной поливинилхлоридной защитной оболочки в процессе старения наблюдается рост контактной разности потенциалов, что является подтверждением ее окисления.

Динамика изменений контактной разности потенциалов в процессе старения в зависимости от применяемых материалов и конструктивного исполнения согласуется с результатами измерений диэлектрических параметров кабелей: емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. Величина размаха диэлектрических параметров также является информативным показателем для оценки состояния поверхности изоляции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bhushan B. Introduction to Tribology. Second Edition. John Wiley & Sons, 2013. – 711 p.

2. Безпрозванних Г.В. Бойко А.М. Електростатичні процеси в силових кабелях // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №4. – С. 27-31.

3. Безпрозванних Г.В., Бойко А.М. Експериментальне визначення трибоелектричного потенціалу в неекранованих та екранованих кабелях // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №3. – С. 56-60.

4. Безпрозванних Г.В. Бойко А.М. Трибоелектричний ефект в електроізоляційних конструкціях // Тези доповідей XX міжн.-практ. конф., Ч.2. 15-17 травня 2012 р., Харків, НТУ "ХПІ", 324 с.

5. Бойко А.Н. Дрейф во времени емкости и тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированных и экранированных сетевых кабелей // Вісник НТУ "ХПІ". – 2013. – №42(948). – С. 65-68.

6. Беспрозванных А.В. Термо-трибо-электрический потенциал для оценки старения полимерной изоляции // Вестник НТУ "ХПИ". – 2009. – №27. – С. 16-24. 7. Безпрозванних Г.В., Бойко А.М. Патент України на корисну модель №83470. Спосіб визначення старіння полімерної ізоляції екранованого багатожильного кабелю UA МПК (2013.01) G01B 1/00 H01B 9/00 H01B 11/00. Публ. 10.09.2013, бюл. №17.

REFERENCES: 1. Bhushan B. Introduction to Tribology. Second Edition. John Wiley & Sons Publ., 2013. 711 p. 2. Bezprozvannych G.V., Boyko A.M. Electrostatic processes in power cables. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2013, no4, pp. 27-31. 3. Bezprozvannych G.V., Boyko A.M. Experimental determination of triboelectric potential in unshielded and shielded network cables. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2012, no.3, pp. 56-60. 4. Bezprozvannych G.V. Boyko A.M. Triboelectric effect in electrical design. Anotatsii dopovidei 20 Mizhn. nauk.-prakt. konf. "Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiia, osvita, zdorov'ia" [Abstracts of 20th Int. Sci.-Pract. Conf. "Information technology: science, engineering, technology, education and health"]. Kharkov, 2012, p. 324. 5. Boyko A.N. Drift in time capacity and dielectric loss tangent of unshielded and shielded network cables. Visnyk NTU "KhPI" - Bulletin of NTU "KhPI", 2013, no.42(948), pp. 65-68. 6. Besprozvannykh A.V. Thermo-triboelectric potential to assess aging polymeric insulation. Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI", 2009, no.27(948), pp. 16-24. 7. Bezprozvannych G.V., A.M. Boyko Sposib viznachennia starinnia polimernoï izoliatsiï ekranovanogo bagatozhil'nogo kabeliu [Method of determining the aging of polymeric insulation shielded multicore cable]. Patent UA, no.83470, 2013.

Поступила (received) 21.07.2014

Беспрозванных Анна Викторовна<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Бойко Антон Николаевич<sup>1</sup>, аспирант, <sup>1</sup> Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

 $\tau e_{\rm J}/phone + 38\ 057\ 7076010,$ 

e-mail: bezprozvannych@kpi.kharkov.ua

A.V. Bezprozvannych<sup>1</sup>, A.N. Boyko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

## Contact potential difference as a measure of power cable polymer insulation aging.

The paper shows dynamics of changing contact potential difference in power cables with cross-linked polyethylene insulation in the initial state and after additional thermal-radiation aging. The cable metal elements grounding is proposed to do before measurements in order to reduce the degree of surface charges action. It is experimentally revealed that the contact potential difference is a sensitive indicator of polymer insulation aging (oxidation) processes.

*Key words* – contact potential difference, power cables, thermal-radiation aging, surface charges, polymer insulation oxidation.

А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КУСОЧНО-ОДНОРОДНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Виконано розрахунки напруженості електростатичного вісісиметричного поля на основі рішення інтегрального рівняння Фредгольма першого та другого роду в частково-однорідній лінійній ізотропній полімерній ізоляції. На основі проведеного обчислювального експерименту за допомогою розробленої програми в середовищі Matlab виконано аналіз впливу числа вузлів на точність чисельного рішення та обґрунтовано порядок системи лінійних алгебраїчних рівнянь в області малих відстаней між сферичними включеннями.

Выполнен расчет напряженности электростатического осесимметричного поля на основе решения интегрального уравнения Фредгольма первого и второго рода в кусочно-однородной линейной изотропной полимерной изоляции. На основе проведенного вычислительного эксперимента с помощью разработанной программы в среде Matlab выполнен анализ влияния числа узлов на точность численного решения и обоснован порядок разрешающей системы линейных алгебраических уравнений в области малых расстояний между сферическими включениями.

#### ВВЕДЕНИЕ

Силовые кабели среднего и высокого напряжения с полимерной изоляцией на основе вулканизированного полиэтилена, этилен-пропиленовой резины все более широко применяются в энергетических системах, причем доминируют кабели со сшитой полиэтиленовой изоляцией. Требования к однородности изоляции, как для кабелей среднего, так и высокого напряжения, достаточно высоки. Размер допустимых примесей не должен превышать 200 и 100 мкм для кабелей класса напряжения 6-35 кВ и 35-220 кВ соответственно. Любая неоднородность приводит к локальному повышению напряженности поля и развитию дендритов, которые являются источником частичных разрядов в изоляции и приводят, в конечном итоге, к преждевременному пробою кабеля.

Полиэтиленовая изоляция по своей морфологии является неоднородной, гетерогенной средой, т.к. содержит, прежде всего, аморфную и кристаллическую фазы, свойства которых отличаются. Энергия разрыва молекул полиэтилена превышает 4 эВ [1]. Средняя рабочая напряженность электрического поля составляет 2 и 6 кВ/мм для кабелей среднего и высокого напряжения соответственно. При таких значениях напряженностей электрического поля вероятность разрыва связей в полиэтиленовой изоляции маловероятна, разве что в присутствии разного рода точечных дислокаций. Разрыв межмолекулярных связей – более вероятен, т.к. энергия связи, по крайней мере, на порядок меньше. И, как результат, с большей вероятностью наблюдается разрыв связей именно аморфной фазы, как более слабого звена. В структуре изоляции возникают наноразмерные субмикротрещины, накопление которых приводит к образованию микротрещин. Для полиэтилена, как и других полимерных материалов, характерна внутримолекулярная и межмолекулярная пористость (от 1 до 5 нм). В термопластичном полиэтилене количество микропустот составляет, в среднем, до 10<sup>4</sup> в 1 мм<sup>3</sup> при максимальном размере до 80 мкм. Полиэтиленовая изоляция способна растворить определенное количество влаги: коэффициент растворимости в зависимости от плотности при температуре 20°С варьируется от 1,66 до 11,2

кг/(м<sup>3</sup>·Па) [2]. При сшивании с помощью полифункциональных групп максимальный размер микропустот составляет 200 мкм при том же количестве в единице объема, которые могут быть частично заполнены влагой. В результате совместного действия воды, микродефектов, напряженности электрического поля и температуры (термомеханических напряжений) на полиэтиленовую изоляцию в ней развиваются водные триинги – окисленные участки изоляции с суб- и микропустотами, заполненные водой. Размер молекулы воды составляет порядка  $2,5^{0}_{A} = 0,25$  нм. Однако благодаря способности молекул воды образовывать определенные структуры, основанной на наличии водородных связей, в отдельных микрообъемах воды непрерывно возникают своеобразные ассоциаты – кластеры – структурные элементы. Связь в таких кластерах называется водородной. Она является очень слабой, легко разрушаемой, в отличие от ковалентных связей. Свободные, не связанные в кластеры, молекулы воды присутствуют в воде лишь в очень небольшом количестве. В основном же вода – это совокупность беспорядочных кластеров и "водяных кристаллов", где количество связанных в водородные связи молекул может достигать сотен и даже тысяч единии.

Появление водных триингов служит предпосылкой для возникновения электрических триингов, которые и являются причиной отказов кабелей. Скорость прорастания триингов определяется морфологией полиэтиленовой изоляции (соотношением аморфной и кристаллической фазы), напряженностью электрического поля, рабочей температурой, концентрацией включений. При этом различают триинги типа "веер" и "бант": рост первых начинается на границе раздела между изоляцией и полупроводящими экранами, вторых - в толще изоляции с дефектами. Результаты ускоренного старения во влажных условиях в течение 1000 ч образцов мини-кабелей среднего напряжения с изоляцией на основе сшитого полиэтилена без антитриинговых добавок показывают [3], что максимальная длина триинга типа "бант" составляет 750 мкм при средней длине 136 мкм и концентрации 6,5 1/мм<sup>3</sup>. Триинги типа "веер" "прорастают" от полупроводящих экранов по жиле и изоляции. В первом случае максимальная длина составляет 1050 мкм при средней длине 632 мкм и концентрации 2,1 1/мм<sup>3</sup>, во втором – 50 мкм при средней длине 33 мкм и концентрации 0,001 1/мм<sup>3</sup> соответственно [3].

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Вопросам построения моделей для расчета и анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями разной формы, взаимным расположением и с разными электрофизическими параметрами посвящен ряд работ [4-8]. Численные расчеты выполняются с использованием пакетов прикладных программ, реализующих метод конечных элементов [4-8]. Так, расчеты, выполненные в [4], показывают, что коэффициент неоднородности электрического поля (отношение максимального значения напряженности поля в расчетной области к среднему значению напряженности во всей изоляции) возрастает более чем в три раза (с 20 до 87) при увеличении диаметра водяного включения в 10 раз (с 5 до 50 мкм). В [8] на основе разработанной математической модели с примепакета прикладных программ нением Cosmol Multiphisics получено распределение напряженности электрического поля в изоляции с гетерогенными включениями разных конфигураций. Исследованы закономерности увеличения максимальной напряженности электрического поля в диэлектриках при увеличении размеров электропроводящих включений и уменьшении расстояния между ними вдоль поля.

Цель статьи – проведение серии вычислительных экспериментов для расчета напряженности электростатического осесимметричного поля на основе решения интегральных уравнений Фредгольма в кусочно-однородной линейной изотропной полимерной изоляции с включениями. На основе проведенных исследований с применением разработанных программ выполнить анализ влияния числа узлов на точность численного решения и обосновать порядок разрешающей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) в области малых расстояний между сферическими микровключениями.

#### ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ПОЛЯ

Кабели напряжением 6-35 кВ выпускаются, как правило, в одножильном исполнении, высокого и сверхвысокого напряжения – только в одножильном.

Типовая коаксиальная конструкция кабелей среднего и высокого напряжения в одножильном исполнении имеет осевую симметрию и состоит из: токопроводящей жилы; трехслойной изоляции, включая полупроводящий экран по жиле, полимерную изоляцию, полупроводящий экран по изоляции; медного экрана; защитной полимерной оболочки.

В основе численного метода расчета напряженности поля лежат интегральные уравнения Фредгольма первого и второго рода (метод вторичных источников) для осесимметричного поля [9-11]. Для неизвестной плотности поверхностных зарядов  $\sigma(M)$  осесимметричного тела при размещении точки Q на поверхности электрода (токопроводящей жилы, металлического экрана), потенциал U которого задан, интегральное уравнение Фредгольма первого рода имеет вид:

$$\frac{1}{\pi\varepsilon_0} \int \frac{K(k) \cdot R_M \cdot \sigma(M)}{\sqrt{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}} \cdot dL_M = U, \quad (1)$$

где K(k) – полный эллиптический интеграл первого

рода; 
$$k = \sqrt{\frac{4R_Q \cdot R_M}{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}}$$
 – аргумент пол-

ного эллиптического интеграла первого рода K(k);  $R_Q$ ,  $R_M$  – радиус-векторы точек Q (где ищется потенциал) и M (где размещен кольцевой заряд;  $R_M$  – радиус кольцевого заряда);  $Z_Q$  – высота точки Q;  $Z_M$  – высота кольцевого заряда над осью радиусов R (рис. 1 [11]).

Поверхность осесимметричного тела является результатом вращения образующей L вокруг оси симметрии OZ (рис. 1): при вращении отрезка  $\Delta L$  вокруг оси образуется элементарный круговой поясок. Плотность поверхностного заряда  $\sigma$  кругового пояска в силу осевой симметрии одна и та же по длине окружности.

Заменяя в (1) интеграл конечной суммой

$$\frac{1}{\pi\varepsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{K(k_{ij}) \cdot R_j \cdot \sigma(M_j)}{\sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}} \cdot \Delta L_j \approx U \quad , \quad (2)$$

и записывая (2) N раз, помещая каждый раз точку i в новое место, получим систему линейных алгебраических уравнений, решив которую можно найти искомые плотности поверхностных зарядов  $\sigma(M_j)$  [индексом i обозначена точка пространства, где ищется потенциал, а индексом j – точка, где находится кольцевой заряд].



В матричной форме:

$$\overline{A} \cdot \overline{\sigma} = \overline{U} . \tag{3}$$

Коэффициенты  $a_{ij}$  СЛАУ (3) определяются по формулам:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\pi \varepsilon_0} \cdot \frac{K(k_{ij}) \cdot R_j \cdot \sigma(M_j)}{\sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}} \cdot \Delta L_j & \forall i \neq j; \\ \frac{1}{2\pi \varepsilon_0} \cdot \ln \left( \frac{16 \cdot R_j}{\Delta L_j / e} \right) \cdot \Delta L_j & \forall i = j. \end{cases}$$
(4)

При работе кабеля под переменным напряжением частоты 50 Гц постоянная времени т саморазряда кабеля, определяемая емкостью и сопротивлением высококачественной неполярной полиэтиленовой изоляции, больше полупериода приложенного напряжения  $\tau > 1/(2f)$ . В такой изоляции объемные заряды не успевают накапливаться, и напряженность поля распределяется в соответствии со значениями диэлектрических проницаемостей:  $\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 = \varepsilon_3 E_3$ . При наличии в изоляции неоднородностей на границах раздела изоляция – неоднородность будут наблюдаться скачки напряженности электрического поля  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_2/\varepsilon_3$ .

Расчет поля в кусочно-однородной диэлектрической среде с относительными диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  сводится к расчету поля в однородной среде с дополнительными вторичными источниками расположенными так, чтобы на границе раздела диэлектрических сред для нормальных составляющих, претерпевающих излом, выполнялось условие:  $\varepsilon_1 \cdot E_{1n} = \varepsilon_2 \cdot E_{2n}$  [9-11]. Интегральное уравнение Фредгольма второго рода для связанных зарядов на границе диэлектрических сред для осесимметричного поля имеет вид:

$$\frac{\sigma(Q)}{2\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \int (n_R \ dE_R + n_Z \ dE_Z) = 0 \ , \qquad (5)$$

где  $n_R$ ,  $n_Z$  – компоненты вектора нормали к образующей в точке Q;  $dE_R$ ,  $dE_Z$  – радиальная и осевая компоненты вектора напряженности поля в *i*-й точке при единичной поверхностной плотности заряда *j*-го пояска ( $\sigma_j = 1$  Кл/м<sup>2</sup>)

$$dE_{R} = \frac{\Delta L_{M}}{4\pi\varepsilon_{0} \cdot R_{Q}} \cdot \sqrt{\frac{R_{M}}{R_{Q}}} \cdot k^{2} \begin{cases} \frac{k}{2}K(k) \cdot \left(\frac{R_{Q}}{R_{M}}+1\right) - \\ -K'(k) \cdot \left[1 - \frac{k^{2}}{2}\left(\frac{R_{Q}}{R_{M}}+1\right)\right] \end{cases};$$
$$dE_{Z} = \frac{\Delta L_{M}}{4\pi\varepsilon_{0} \cdot R_{Q}} \cdot \frac{k^{3}\left(Z_{Q} - Z_{M}\right)}{2\sqrt{R_{Q}R_{M}}} \cdot \left[K(k) + k \cdot K'(k)\right], \quad (6)$$

где K'(k) – производная функции полного эллиптического интеграла первого рода по параметру k;  $k'_{R_Q}$  – производная параметра k по радиальной координате точки Q;  $k'_{Z_Q}$  – то же самое по осевой координате точки Q. Производная функции полного эллиптического интеграла первого рода K'(k) вычисляется путем дифференцирования аналитического приближения к K(k):

$$K(k) \approx a_0 + a_1 m + a_2 m^2 + (b_0 + b_1 m + b_2 m^2) \cdot \ln \frac{1}{m}$$

$$m = 1 - k^2;$$

$$K'(k) \approx \left[ a_1 + 2 \cdot a_2 m + (b_1 + 2b_2 m) \cdot \ln \frac{1}{m} + (b_0 + b_1 m + b_2 m^2) \cdot m(-\frac{1}{m^2}) \right] \cdot (-2k),$$

$$1.20(2044 = 0.1110722 = 0.0772722(-k))$$

где  $a_0 = 1,3862944; a_1 = 0,1119723; a_2 = 0,0725296; b_0 = 0,5;$  $b_1 = 0,1213478; b_2 = 0,0288729; a_1 = 0,4630151;$  $a_2 = 0,1077812; b_1 = 0,2452727; b_2 = 0,0412497$  [12]. Уравнение (5) сводится к СЛАУ вида:

$$\overline{B} \cdot \overline{\sigma} = 0, \qquad (7)$$

в которой элементы матрицы коэффициентов определяются как

$$b_{ij} = \begin{cases} -\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot (n_R dE_R + n_Z dE_Z) & \forall i \neq j; \\ \frac{1}{2\varepsilon_0} & \forall i = j. \end{cases}$$
(8)

Плотность поверхностных зарядов на границах раздела сред с учетом неоднородности диэлектрика определится в результате решения составной на основе (3) и (7) СЛАУ вида:

$$A \cdot \overline{\sigma} = \overline{U} , \qquad (9)$$

где  $\overline{\sigma}$  – матрица-столбец неизвестных расчетных плотностей вторичных зарядов, Кл/м<sup>2</sup>;  $\overline{U}$  – матрицастолбец, первые  $N_e/2$  членов которой отражают заданные потенциалы узлов, лежащих на токопроводящей жиле, а вторые  $N_e/2$  – на заземленном экране и остальные  $N_d = N_e+1:N$  на границах раздела диэлектрических сред – равны нулю;  $\overline{A}$  – квадратная матрица коэффициентов, элементы которой  $a_{ij}$  и  $b_{ij}$  находятся по формулам (4) и (8), вытекающих из интегральных уравнений Фредгольма первого рода для узлов, лежащих на электродах, и второго рода – для узлов, лежащих на границе раздела диэлектрических сред (в данном случае изоляции и сферических включений).

После решения СЛАУ (9) напряженность электрического поля (нормальная составляющая) находится по формулам:

$$E_{in} = \begin{cases} \sigma_i / \varepsilon_0; & i = 1 \div N_e; \\ \sigma_i / (2\varepsilon_0) \cdot (1 + 1/\beta); & i = N_e + 1 \div N, \end{cases}$$
(10)

где  $\beta = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}$  – параметр, связанный с разностью

диэлектрических проницаемостей по направлению нормали к границе раздела сред.

#### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

На рис. 2 показана расчетная модель: между токопроводящей жилой радиусом  $R_1$  и металлическим экраном (радиус по экрану  $R_4$ ) расположена полимерная изоляция толщиной  $\Delta_{in}$  с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$ . В толще изоляции на расстоянии h друг от друга расположены два сферических включения с радиусами  $R_{v2}$  и  $R_{v3}$  соответственно. Диэлектрические проницаемости включений в общем случае – разные и равны  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  соответственно.

Расчет электростатического поля в кусочнооднородной среде сводится к решению составной СЛАУ (9), для решения которой используется метод Гаусса.

Последовательность расчета следующая [13]: разбиение поверхностей электродов (токопроводящей жилы и металлического экрана) и сферических включений на элементарные участки; составление головной программы, в которой реализуется вычисление коэффициентов СЛАУ, решение и расчет напряженностей на поверхностях жилы и включений; выполнение серии вычислительных экспериментов и анализ полученных результатов расчета. Применяется сквозная нумерация всех узлов: сначала нумеруются узлы, расположенные на жиле и экране, а затем – на границах раздела включений и изоляции. Результаты расчета представляются в виде разверток по длине образующей коэффициента неоднородности электростатического поля, равного отношению расчетной напряженности к среднему значению напряженности изоляционного промежутка.



# РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Расчеты выполнены для полиэтиленовой вулканизированной изоляции толщиной  $\Delta_{in} = 3$  мм с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1 = 2,3$  на частоте 50 Гц. Радиус токопроводящей жилы равен 50 мм. Потенциал нижнего электрода (жилы) равен 6 кВ, верхнего (заземленного экрана) – 0 В. Среднее значение напряженности поля в толще изоляции без включений составляет 2 кВ/мм.

Развертки напряженности поля по поверхностям двух сферических включений – кластерам, заполненных водой ( $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 80$ ), при разных значениях расстояния *h* между ними приведены на рис. 3: кривая 1 – *h* =5 мкм; кривая 2 – 2,5 мкм; кривая 3 – 1 мкм; кривая 4 – 0,5 мкм и кривая 5 – 0,25 мкм. На рис. 3,а представлены результаты для включений одинакового диаметра – 100 мкм, а на рис. 3,б – разного: 50 мкм (расположен ближе к жиле) и 30 мкм.

Коэффициент неоднородности напряженности поля при равных расстояниях между включениями больше, в среднем, в 1,5 раза для включений одинакового диаметра (сравни кривые рис. 3,а и рис. 3,б). При пропорциональном уменьшении расстояния между кластерами воды коэффициент неоднородности поля изменяется не пропорционально: причем, для меньших расстояний непропорциональность более выражена. Данные результаты расчета согласуются с результатами расчета, приведенными в [4, 8]: в случае включений большего включения неоднородность поля увеличивается.

Для повышения точности численных расчетов поля в малых изоляционных зазорах приходится увеличивать число узлов  $N_d$  на границах раздела диэлектрических сред. Так, на рис. 4 приведены результаты расчета при разном числе узлов между сферическими



включениями одинакового диаметра 100 мкм. При зазоре 0,25 мкм (рис. 4,а) кривая 1 соответствует числу узлов  $N_d = 600$ , кривая  $2 - N_d = 1000$ , кривая  $3 - N_d = 1000$ , кривая 3 -  $N_d = 1000$
$N_d = 1400$ . При расстоянии 0,125 мкм (рис. 4,6) кривая 1 соответствует числу узлов  $N_d = 1200$ , кривая 2 –  $N_d = 1400$ , кривая 3 –  $N_d = 1600$ , кривая 4 –  $N_d = 1800$ , кривая 5 –  $N_d = 2000$ .

Анализ результатов расчета показывает, что развертки напряженности по образующим сферических включений – плавные линии, флуктуации решения (осцилляции) – отсутствуют, что является признаком устойчивости для СЛАУ большого порядка (1800 и выше).

Однако точность численных расчетов определяется числом узлов на границах раздела диэлектрических сред. Начиная с некоторого значения N<sub>d</sub>, результаты расчета не меняются. Это значение можно считать оптимальным. Так, при зазоре 0,25 мкм, число узлов должно быть не менее 1400. При уменьшении расстояния между включениями в два раза число узлов должно быть не менее 1800. В противном случае погрешность расчета возрастает в 2 и 3,5 раза для зазоров 0,25 и 0,125 мкм соответственно. При недостаточном числе узлов расчеты дают существенно завышенные значения коэффициента неоднородности поля – проявляется резонанс численного решения в силу того, что расстояние между сферическими включениями оказывается одного порядка с элементарным участком разбиения образующей. В таком случае эффективным является также использование вспомогательных узлов [14]. При этом порядок СЛАУ не изменяется, но точнее вычисляются коэффициенты b<sub>ii</sub>. Увеличение числа узлов на электродах не влияет на повышение точности расчета поля в малых изоляционных промежутках. Во всех случаях число узлов на электродах было принято равным 200.

## выводы

Проведена серия вычислительных экспериментов для расчета напряженности электростатического осесимметричного поля на основе решения интегральных уравнений Фредгольма в кусочнооднородной полиэтиленовой изоляции со сферическими включениями.

На основе проведенных исследований с применением разработанных программ выполнен анализ влияния числа узлов на границе раздела диэлектрических сред на точность численного решения и обоснован порядок разрешающей системы линейных алгебраических уравнений в области малых расстояний (менее 0,05R) между сферическими микровключениями.

В области малых зазоров между сферическими кластерами воды в большей степени наблюдается искажение поля: уменьшение зазора в два раза (с 0,25 мкм до 0,125 мкм) привело к росту напряженности поля в 3 раза (сравни, кривые 3 и 5 на рис. 4,а и 4,6).

Анализ расчетов показывает, что изменение числа узлов на электродах (жиле и заземленном экране) не влияет на повышение точности вычислительного эксперимента. Порядок разрешающей системы линейных алгебраических уравнений определяется числом узлов на границах раздела диэлектрических сред. Оптимальное значение порядка разрешающей СЛАУ определяется для каждой расчетной модели индивидуально. В любом случае для повышения точности решения необходимо, чтобы расстояние *h* между сферическими включениями было больше элементарного участка образующей ΔL.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техніка і електрофізика високих напруг / за ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. Харків, Торнадо, 2005. – 930 с.

2. Беспрозванных А.В. Гигроскопическое увлажнение телефонного кабеля с полиэтиленовой оболочкой // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – №4. – С. 40-44.

3. Кри С., Кьелквист Е., Шувалов М.Ю., Овсиенко В.Л., Колосков Д.В. Электрическая прочность и развитие водных триингов в образцах миниатюрных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с различным содержанием добавки, препятствующей развитию триингов // Кабели и провода. – 2011 – №6. – С. 3-7.

4. Щерба А.А., Перетятко Ю.В. Моделирование неоднородных электрических полей в высоковольтной твердой полимерной изоляции с гетерогенными микровключениями // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2007. – №597. – С. 123-129.

5. Щерба А.А., Перетятко Ю.В., Золотарев В.М. Моделирование электрических полей и расчет объемов с критической напряженностью в полимерной изоляции высоковольтных кабелей и СИП // Технічна електродинаміка. – 2008. – №2. – С. 113-119.

6. Щерба А.А., Золотарев В.М., Перетятко Ю.В., Ершов С.Е., Скиба Б.А. Анализ закономерностей возмущения электрического поля в полимерной изоляции совокупностью близко расположенных водных и воздушный микровключений // Технічна електродинаміка. – 2009. – №3. – С. 64-67.

7. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М. Математическая модель и методика численного расчета неоднородного электрического поля и нагрева полиэтиленовой изоляции высоковольтных силовых кабелей при возникновении дендритных микроканалов // Технічна електродинаміка. – 2006. – №4. – С. 116-120.

8. Щерба А.А., Щерба М.А. Моделирование и анализ электрического поля в диэлектрической среде, возмущенного проводящими микровключениями разных размеров и конфигураций // Технічна електродинаміка. – 2010. – №6. – С. 3-9.

9. Колечицкий Е.С. Численный метод расчета осесимметричных электростатических полей // Электричество. - 1972. - №7. - С. 57-61.

10. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975. – 295 с.

11. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей. – К: ИСДО, 1995. – 120 с.

12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973.

13. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В. Методические указания к решению задач оптимизации конструкций высоковольтных изоляционных промежутков по курсу "Расчет и конструирование изоляции". – Х., 1988. – 30 с.

14. Беспрозванных А.В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях // Технічна електродинаміка. – 2010. – №1. – С. 23-29.

**REFERENCES:** *1.* Brzhezycz'kyj V.O., Myhajlov V.M. *Tekhnika i elektrofizyka vysokykh napruh* [Technics and Electrophysics of High Voltages]. Kharkov, Tornado Publ., 2005. 930 p. *2.* Bezprozvannych G.V. Hygroscopic humidifying of a polyethylene-sheathed telephone cable. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2005, no.4, pp. 40-44. *3.* Kry S., K'elkvyst E., Shuvalov M.Yu., Ovsienko V.L., Koloskov D.V. Dielectric strength and development of water treeing in samples of miniature cables with XLPE insulation with different contents of additives, which prevents the development of treeing. *Kabeli i provoda – Cables and wires*, 2011, no.6, pp. 3-7. *4.* Shherba A.A., Peretyatko Yu.V. Modeling of inhomogeneous

electric fields in the high solid polymeric insulation with heterogeneous microinclusions. Visnyk Natsional'noho universytetu "L'vivs'ka politekhnika" - Bulletin of National University "Lviv Polytechnic", 2007, no.597, pp. 123-129. 5. Shherba A.A., Peretyatko Yu.V., Zolotarev V.M. Simulation of electric fields and calculation of volumes with critical tension in polymer insulation high-voltage cables and SsIW. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics, 2008, no.2, pp. 113-119. 6. Shherba A.A., Zolotarev V.M., Peretyatko Yu.V. Analysis of the regularity of the perturbation of the electric field in polymeric insulation by the set of closely spaced water and air microinclusions. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics, 2009, no.3, pp. 64-67. 7. Shydlovskij A.K., Shherba A.A., Podol'cev A.D., Kuchervavava Y.N., Zolotarev V.M. Mathematical model and method of the numerical calculation of non-uniform electric field and of the heating polyethylene insulation of high-voltage power cables in the event of dendritic microchannels. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics. 2006, no.4, pp. 116-120. 8. Shherba A.A., Shherba M.A. Modeling and analysis of electric field in a dielectric medium, perturbed conductive microinclusions different sizes and configurations. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics, 2010, no.6, pp. 3-9. 9. Kolechitsky E.S. Numerical method to calculate axisymmetric electrostatic fields. Elektrichestvo - Electricity, 1972, no.7, pp. 57-61. 10. Tozoni O.V. Metod vtorichnykh istochnikov v elektrotekhnike [Method of secondary sources in electrical engineering]. Moscow, Energy Publ., 1975. 295 p. 11. Naboka B.G. Raschety elektrostaticheskikh polei v elektroizoliatsionnoi tekhnike: uchebnoe posobie dlia studentov elektroenergeticheskikh spetsial'nostei [Settlements electrostatic fields in the insulating technique: a textbook for students of electric power specialties]. Kiev, IEDL Publ., 1995. 120 p. 12. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 13. Naboka B.G., Bezprozvannych A.V. Metodicheskie ukazaniia k resheniiu zadach optimizatsii konstruktsii vysokovol'tnykh izoliatsionnykh promezhutkov po kursu "Raschet i konstruirovanie izoliatsii" [Methodical instructions to solving structural optimization of high insulation spaces on the course "Calculation and design of isolation"]. Kharkov, 1988. 30 pp. 14. Bezprozvannych A.V. Strong electric field and partial discharges in multi-core cables. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics, 2010, no.1, pp. 23-29.

Поступила (received) 14.07.2014

Беспрозванных Анна Викторовна<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Кессаев Александр Геннадиевич<sup>1</sup>, аспирант, <sup>1</sup> Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076010, e-mail: bezprozvannych@kpi.kharkov.ua

A.V. Bezprozvannych<sup>1</sup>, A.G. Kyessaeyv<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine **Computing experiments for calculation of electrostatic axisymmetric field in piecewise-homogeneous insulation** 

axisymmetric field in piecewise-homogeneous insulation with spherical inclusions.

Calculations of electrostatic axisymmetric field are made with application of solution to Fredholm integral equation of the first and the second kinds in a piecewise homogeneous isotropic linear polymeric insulation. On the basis of numerical experiments via a Matlab-based program, influence of the number of nodes on the numerical solution accuracy is analysed and the order of the resolving system of linear algebraic equations within small distances between spherical inclusions is validated. *Key words* – electrostatic axisymmetric field, computing experiment, spherical inclusions, linear algebraic equations, numerical solution accuracy.