

ISSN 2074-272X

2012/6 //

# ЕЕС електротехніка / Електромеханіка

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Електричні машини та апарати

Теоретична електротехніка

Техніка сильних електрических та магнітних полів

Електричний транспорт

Електричні станції, мережі і системи

Ювілеї



# НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

## ДЕРЖВИДАННЯ

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики,  
телебачення та радіомовлення України КВ № 6115 від 30.04.2002 р.  
Видання засновано у 2002 р. Національним технічним університетом  
«Харківський політехнічний інститут»

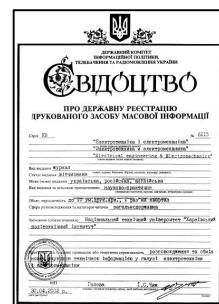
## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

### Головний редактор

Клименко Б.В. д.т.н., професор, НТУ «ХПІ», Харків

### Члени редколегії

Баранов М.І.	д.т.н., начальник відділу НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», Харків
Батигін Ю.В.	д.т.н., професор завідувач кафедри фізики, ХНАДУ, Харків
Боєв В.М.	д.т.н., професор кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ», Харків
Болюх В.Ф.	д.т.н., професор кафедри загальної електротехніки НТУ «ХПІ», Харків
Буткевич О.Ф.	д.т.н., професор, головний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ
Гончаров Ю.П.	д.т.н., професор кафедри промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХПІ», Харків
Гурін А.Г.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ «ХПІ», Харків
Данько В.Г.	д.т.н., професор, завідувач кафедри загальної електротехніки НТУ «ХПІ», Харків (голова редакційної ради)
Жемеров Г.Г.	д.т.н., професор кафедри промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХПІ», Харків
Загірняк М.В.	д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, ректор КрНУ, Кременчук
Кириленко О.В.	д.т.н., професор, академік НАНУ, директор ІЕД НАНУ, Київ
Кравченко В.І.	д.т.н., професор, директор НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», Харків
Маслієв В.Г.	д.т.н., професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ», Харків
Михайлов В.М.	д.т.н., професор кафедри інженерної електрофізики НТУ «ХПІ», Харків
Міліх В.І.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин НТУ «ХПІ», Харків
Намітоков К.К.	д.т.н., професор кафедри світлотехніки і джерел світла ХНАМГ, Харків
Омельяненко В.І.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ», Харків
Панасенко М.В.	д.т.н., професор, начальник Харківської філії ДНДЦ Укрзалізниці, Харків
Подольцев О.Д.	д.т.н., провідний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ
Пуйло Г.В.	д.т.н., професор кафедри електричних машин ОНТУ, Одеса
Резцов В.Ф.	д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, керівник відділення ІЕД НАНУ, Київ
Рудаков В.В.	д.т.н., професор, завідувач кафедри інженерної електрофізики НТУ «ХПІ», Харків
Сокол Є.І.	д.т.н., професор, проректор НТУ «ХПІ», Харків
Сосков А.Г.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електротехніки ХНАМГ, Харків
Ткачук В.І.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин і апаратів НУ «Львівська політехніка», Львів
Шинкаренко В.Ф.	д.т.н., професор, завідувач кафедри електромеханіки НТУУ «КПІ», Київ
Юферов В.Б.	д.т.н., начальник відділу ННЦ ХФТІ, Харків



## АДРЕСА РЕДАКЦІЇ

Кафедра «Електричні апарати», НТУ «ХПІ», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна.  
тел.: +38 057 707 62 81. e-mail: a.m.grechko@mail.ru

ISSN 2074-272X

© Національний технічний університет «ХПІ», 2012

Підписано до друку 30.11.2012 р.

Формат 60 x 90 ¼. Офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 8,875.

Наклад 200 прим. Зам. № 0096/0128. 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, 8



**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА  
ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS**  
**Науково-практичний журнал**

**EIE**

*Рекомендовано до видання Вченого радио Національного технічного  
університету «Харківський політехнічний інститут»  
Протокол №8 від 30 жовтня 2012 р.*

**2012/6**

## **ЗМІСТ**

### **Електротехніка. Визначні події. Славетні імена**

<b>Баранов М.И.</b>	Антология выдающихся достижений в науке и технике.	<b>3</b>
	Часть 11: Классическая механика	
<b>Грицаенко В.І.</b>	Генезис винахідництва	<b>13</b>

### **Електричні машини та апарати**

<b>Афанасов А.М.</b>	Расхождение тепловых факторов обмоток якорей тяговых электрических машин при испытании на нагрев методом взаимной нагрузки	<b>16</b>
<b>Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С.</b>	Влияние параметров феромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя	<b>20</b>
<b>Лущик В.Д.</b>	Хромосомо-генна теорія електромеханічних систем на прикладі електромеханічних дезінтеграторів	<b>28</b>
<b>Петрушин В.С., Якимец А.М., Бангула В.Б.</b>	Анализ пуска асинхронного двигателя с помощью тиристорного преобразователя напряжения	<b>31</b>

### **Теоретична електротехніка**

<b>Шидловская Н.А., Захарченко С.Н.</b>	Сравнительный анализ использования алгебраических и гиперболических полиномов при исследовании переходных процессов в выходных цепях разрядно-импульсных систем	<b>34</b>
---	---	-----------

### **Техніка сильних електрических та магнітних полів**

<b>Беспрозванных А.В., Лактионов С.В.</b>	Повышение чувствительности высоковольтной системы диагностики силовых кабелей по характеристикам частичных разрядов с помощью фильтров низких частот	<b>37</b>
<b>Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Іванов В.М., Христенко О.А.</b>	Компактный ёмкостный делитель напряжения на 70 кВ с экранированным промежуточным электродом	<b>41</b>
<b>Гнатов А.В.</b>	Тонкий круговой виток с разрезом над тонкостенным листом металла	<b>47</b>
<b>Дубовенко К.В., Зотов О.Р.</b>	Моделювання роботи саморегенеративних обмежувачів струму з малим часом комутації	<b>51</b>

## **Електричний транспорт**

<b>Михаліченко П.Є.</b>	Генераторні струми під час коротких замикань в пристроях системи електричної тяги	<b>56</b>
<b>Сергienко А.Н., Любарский Б.Г., Сергienко Н.Е.</b>	Математическая модель электромеханического преобразователя для электроамортизатора транспортного средства	<b>61</b>

## **Електричні станції, мережі і системи**

<b>Сиротин Ю.А.</b>	Структурное разделение процессов в трехфазной четырехпроводной цепи и компенсация тока нейтрали	<b>66</b>
---------------------	---	-----------

## **Ювілеї**

<b>Фінкельштейн В.Б.</b>	К 70-летию со дня рождения	<b>71</b>
--------------------------	----------------------------	-----------

## **ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!**

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

## **ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!**

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

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

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

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

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

М.І. Баранов

## **АНТОЛОГІЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 11: КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА**

*Наведено короткий науково-історичний нарис про становлення і розвиток в період 17-20 сторіч класичної механіки, її наукові досягнення і їх прикладні застосування.*

*Приведен краткий научно-исторический очерк о становлении и развитии в период 17-20 столетий классической механики, ее научных достижениях и их прикладных приложениях.*

"Истинная и законная цель всех наук состоит в том, чтобы наделять жизнь человеческую новыми открытиями и благами".

Английский философ XVI–XVII веков  
Френсис Бэкон (1561–1626 гг.)

### **1. НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП ЗАРОЖДЕНИЯ И СТАНОВЛЕНИЯ МЕХАНИКИ**

Имя великого древнегреческого механика, физика и математика Архимеда из Сиракуз (287-212 до н.э.) широко известно каждому просвещенному человеку на нашей планете. Архимед (рис. 1) как ученый вошел в историю человечества благодаря, прежде всего, своим следующим выдающимся научным достижениям: *открытию принципа рычага, созданию учения о центре тяжести и открытию знаменитого закона Архимеда*, касающегося поведения физического тела, погруженного в жидкость [1,2]. Архимед был одним из крупнейших инженеров-механиков своего времени и конструкторов машин и механизмов различного применения. Он изобрел машину для орошения (поливки) сельскохозяйственных полей, грузоподъемные блоки и водоподъемный винт, которые нашли широкое практическое использование [1].



Рис. 1. Великий древнегреческий ученый Архимед (287-212 до н.э.) [3]

Он особенно успешно разрабатывал и строил оригинальные конструкции метательных машин военного назначения. В истории науки и техники считается, что именно Архимед стал тем первым крупным ученым, который много внимания и творческих сил отдавал решению актуальных военных задач своего времени. Им было введено новое понятие момента силы относительно прямой линии и плоскости. Он сформулировал правило сложение параллельных сил. Строительная и военная техника древнего мира выдвигала необходимость решения в области механики

(это понятие происходит от греческого слова "τέχνη" – "построение машин" [4]) проблемных задач статики. Поведение этой техники, в основе построения которой лежала разработанная Архимедом элементарная теория механического рычага, было тесным образом связано с вопросами равновесия ее составных частей и подводило ее разработчиков и создателей к выработке понятия центра тяжести тела.

В сочинении (книге) Архимеда "О равновесии плоских фигур" содержатся основные законы механического рычага и способы определения центров тяжести для треугольников, трапеций, параллелограммов, параболических сегментов и других геометрических фигур. Для нас интересным является лаконичное по форме и емкое по содержанию определение центра тяжести тела, данное самим Архимедом [1]: "Центром тяжести каждого тела является некоторая расположенная внутри его точка – такая, что если за нее мысленно подвесить тело, то оно остается в покое и сохраняет первоначальное положение". Свой знаменитый закон Архимед изложил в книге "О плавающих телах", в которой он рассматривает не только условия плавания тел в жидкости, но и вопросы устойчивости равновесия плавающих тел различной геометрической формы [1]. Научный гений Архимеда проявился в этом сочинении и соответственно при решении им задач гидростатики с исключительной силой. Полученные им здесь научные результаты, заложившие основы гидростатики, получили свое дальнейшее развитие в работах таких известных ученых 17-го века как С. Стевина, Г. Галилея, Б. Паскаля и других. Теоретическое же доказательство его фундаментальных результатов в области гидростатики нашло свое место только лишь в 19-ом столетии в трудах известных механиков и математиков мира [1].

Во всемирной истории науки и техники принято считать, что великий итальянский ученый-мыслитель, инженер, изобретатель и художник Леонардо да Винчи (1452-1519 гг.) является предшественником Г. Галилея, И. Ньютона и других знаменитых основателей современного естествознания [1]. Л. да Винчи (рис. 2) одним из первых образованных людей начал борьбу против схоластического метода познания мира и бесплодных богословских дискуссий, противопоставляя им научное знание, основанное на опыте. В те далекие от нас годы средневековья он писал [1]: "Мне кажется, что пусты и полны заблуждений те науки, которые не порождены опытом – отцом всякой достоверности и не завершаются в наглядном опыте". Рассуждая о науках, он заключал [1]: "Истинные науки те, которые опыт заставил пройти сквозь ощущения и наложил молчание на язык спорщиков".

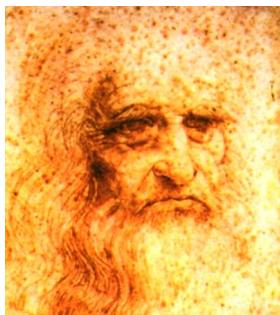


Рис. 2. Автопортрет великого итальянского ученого и изобретателя Леонардо да Винчи (1452-1519 гг.) [5]

Л. да Винчи убежденно придерживался в своих взглядах научного метода нового естествознания, основанного на опыте и математическом анализе. В связи с этим он писал [1]: "Ниакой достоверности нет в науках там, где нельзя приложить ни одной из математических наук, и в том, что не имеет связи с математикой". Рассуждая о механике, он утверждал [1]: "Механика – это рай математических наук, посредством нее достигают математического плода". Изучая движение физических тел, Л. да Винчи считал, что [1]: "Сила есть причина движения, а движение есть причина силы". Это еще не открытие инерции и не формулировка закона инерции в теоретической механике. Но уже определенный шаг вперед к основным научным понятиям классической механики, как науки изучающей механическое движение и равновесие материальных тел под действием приложенных к ним сил. Он изучал механизм трения при движении тела и первым ввел понятие коэффициента трения. Им было открыто существование сопротивления окружающей среды и подъемной силы при быстром движении тела в воздушной среде [4]. Л. да Винчи принадлежит множество **технических изобретений**, значительно опережавших свое время. Это конструкции велосипеда, подводной лодки, вертолета и летательного аппарата, подражающего полету птиц. Среди его изобретений есть переносные мосты для армии, прожектора, скорострельное оружие и гидравлические машины. Его любимым изречением были следующие слова [5]: "Кто знает все, тот может все!".

Великий итальянский ученый-астроном, математик и механик Галилео Галилей (1564-1642 гг.) на основе изобретенной в 1608 году в Нидерландах зрительной трубы, создав с применением комбинации выпуклой и вогнутой оптических линз усовершенствованную подзорную трубу с 32-х кратным увеличением, наблюдал покрытую неровностями Луну и Млечный Путь, состоящий из множества неизвестных звезд. В 1610 году он **открыл спутники у Юпитера** и сделал важный шаг в защиту гелиоцентрической системы устройства мира, предложенной в 1530 году великим польским ученым Николаем Коперником (1473-1543 гг.). Г. Галилей (рис. 3) оказался первым ученым, использовавшим трубу в научных целях.

Он почти одновременно с нидерландским инженером и математиком Симоном Стивином (1548-1620 гг.), опубликовавшим классический труд "Начала статики", занимался вопросами статики и гидростатики. Г. Галилей установил **закон равновесия тел на наклонной плоскости** и восстановил в более простой

форме при помощи принципа возможных перемещений архимедовское доказательство закона механического рычага [1]. Подробному рассмотрению закона Архимеда и условий плавания тел в жидкости посвящено вышедшее в 1612 году сочинение Г. Галилея "Рассуждение о телах, пребывающих в воде" [1].

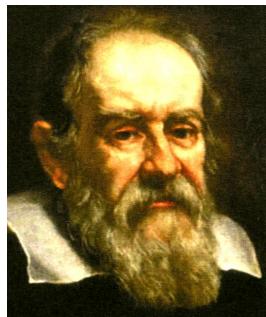


Рис. 3. Великий итальянский ученый Галилео Галилей (1564-1642 гг.) [5]

Дальнейшие эксперименты Г. Галилея продемонстрировали независимость скорости падения в воздухе физических тел одинаковой геометрической формы от их веса (массы). Результаты этих физических опытов и их математический анализ, выполненный Г. Галилеем, стали в то время научной основой в обосновании динамики физических тел и зарождающейся механики в целом. Открыв законы равнousкенного движения тел, Г. Галилей показал и взаимную независимость оказываемых на них силовых действий. Ему принадлежит честь открытия изохронности (одинаковости длительности) колебаний кругового маятника. Это позволило ему сконструировать часы с маятником (конструкцию своих часов он опубликовать не успел) [1]. Дальнейшее **изобретение** в Европе **маятниковых часов**, запатентованное в 1657 году известным нидерландским ученым Христианом Гюйгенсом (1629-1695 гг.), имело огромное для общества научно-практическое значение. В 1673 году Х. Гюйгенсом в сочинении "Маятниковые часы" была изложена теория физического маятника. Здесь он показал, что свойством изохронности обладает циклоида. Поэтому у Х. Гюйгенса маятник в отличие от галилеевского маятника был циклоидальным. Для нас интересной будет формула Х. Гюйгенса, выражаяющая период  $T_M$  колебаний циклоидального маятника (справедлива и для малых колебаний кругового маятника) [1]:  $T_M=2\pi(l_M g^{-1})^{1/2}$ , где  $l_M$  – длина маятника;  $g=9,806 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения [6]. Здесь автор обращает внимание любознательного читателя на определенную общность этого выражения с формулой Томсона, определяющей период  $T_3$  колебаний электрического тока в  $LC$ -цепи [6]:  $T_3=2\pi(LC)^{1/2}$ . Укажем и имя преемника Г. Галилея – известного итальянского ученого Эванджелиста Торричелли (1608-1647 гг.), впервые доказавшего существование атмосферного давления и получившего "торричеллиеву пустоту" (вакуум) [2]. Опыты Э. Торричелли привели к изобретению и созданию первого в мире барометра [1]. Отметим и известного французского физика и математика Блеза Паскаля (1623-1662 гг.), ставшего автором закона о всесторонней передаче давления в жидкости (**закон Паскаля**), **закона сообщающихся сосудов** и **теории гидравлического пресса**, нашедше-

го широкое применение в механике [1]. Им же был установлен факт о падении давления воздуха с увеличением высоты над поверхностью земли. Главный научный труд Г. Галилея "Беседы о двух новых науках", вышедший в свет в 1638 году и спасенный его автором от инквизиции, содержал основы динамики и способствовал дальнейшему выходу в свет в 1687 году знаменитых "Математических начал натуральной философии" великого английского ученого Исаака Ньютона (1642-1727 гг.), ставшего подлинным основоположником классической механики как самостоятельной научной дисциплины о движении и равновесии тел [1-3].

## 2. ОТКРЫТИЕ ПЕРВЫХ ЗАКОНОВ МЕХАНИКИ

Считается, что величайшие научные открытия в человеческом обществе совершаются чаще всего молодыми исследователями. Так произошло и с упомянутым нами выше И. Ньютоном, однако его многие эпохальные научные достижения увидели свет только после ряда десятилетий с момента их получения. Причины тому разные, но здесь следует отметить то одно обстоятельство, что стремление к открытию нового в науке и технике у И. Ньютона подчинялось, прежде всего, обстоятельному доказательству истинности им сделанного и совершенного в различных областях научно-технической сферы знаний [1,5]. Начнем с того, что И. Ньютон (рис. 4) независимо от выдающегося немецкого математика Готфрида Лейбница (1646-1716 гг.) разработал **дифференциальное** (до 1684 года) и **интегральное** (до 1686 года) **исчисления** [2]. Потребность в создании новой (высшей) математики, использующей переменные величины, была тогда в науке острой и насущной. Большую подготовительную работу для ее (новой математики) разработки и создания выполнили выдающиеся предшественники И. Ньютона – Иоганн Кеплер (1571-1630 гг.), Г. Галилей и Рене Декарт (1596-1650 гг.) [1,2].



Рис. 4. Великий английский ученый Исаак Ньютон (1643-1727 гг.) [5]

Но в истории науки, как оказалось, только И. Ньютон и Г. Лейбниц разработали общий математический метод решения задач по проблемам квадратуры криволинейных площадей и поиска максимума и минимума функций. Оказалось, что методы И. Ньютона и Г. Лейбница по сути были идентичны и отличались друг от друга только обозначениями производных: например, у И. Ньютона вторая производная имела вид  $\ddot{y}$  (величины с "точками" наверху – сейчас они употребляются в физике для указания производных по времени), а у Г. Лейбница –  $\dot{y}$  (величины со "штрихами" вверху – эти обозначения производных

оказались более удобными и сохранились до настоящего времени) [1]. Длившийся многие годы острый спор о приорите в вопросе создания дифференциального и интегрального исчислений разделил математиков того времени на два непримиримых лагеря. Приверженцы одного из них защищали приоритет И. Ньютона, а сторонники другого – приоритет Г. Лейбница. Время как истинный "судья" во многих вопросах рассудило их – детальные непредвзятые исторические исследования показали, что оба этих знаменитых ученых к **великому научному открытию в области математики**, в край необходимому для описания динамических механических и электрических процессов в природе, пришли независимо друг от друга. Обобщив свои данные и результаты своих предшественников в области механики (Архимеда, Л. да Винчи, Г. Галилея и др.), И. Ньютон подготовил и издал в 1687 году свой большой печатный научный труд "Математические начала натуральной философии", содержащий основные понятия и аксиомы классической механики и практические приложения новых законов механики к теории движения тел под действием центральных сил. Здесь он впервые в науку о движении и равновесии физических тел ввел принципиально новые понятия, которыми пользуемся и мы поныне: **массы тела, количества движения, силы, ускорения и центростремительной силы** [2].

В самом начале своего гигантского по объему и значимости для науки труда И. Ньютон дает определение "количество материи" ("массы") в следующем простом и ясном виде [1]: "**Количество материи есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее**". И. Ньютон как и древнегреческий атомист Демокрит [1, 7] реальными считал атомы, молекулы и пустоту (вакуум), в которой находятся эти микрочастицы вещества. Количество однородных атомов является, по его мнению, количеством материи. Чем больше ее (материи) объем и чем плотнее расположены атомы в этом объеме, тем больше будет и количество материи (масса вещества). Реально количество материи (массу вещества) он определял по весу тела (оно было пропорционально весу тела). Фундаментальному понятию количества материи (массы тела) И. Ньютон посвятил как анализ тысячелетней практики использования человечеством механических весов для измерения веса, количества вещества и соответственно массы вещества (правда, не зная математической зависимости между ними), так и свои обширные точные опыты в безвоздушных вертикальных трубках по констатации независимости ускорения  $g$  силы тяжести (свободного падения) от массы тела. Заметим, что еще Г. Галилей экспериментально показал, что все тела в отсутствие сопротивления воздуха падают на поверхность земли одинаково. Это дало возможность И. Ньютону обоснованно заключить, что масса  $m$  и вес  $P$  физического тела строго пропорциональны друг другу. В настоящее время в земных условиях мы пользуемся для их определения вытекающим из одного из установленных И. Ньютона законов механики классическим соотношением вида:  $P=m \cdot g$ , где  $g=9,806 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения тела [6]. Из этого простого для нас выражения (следует особо подчеркнуть то, что до И. Ньютона этой удивительно простой зависимости человекечество просто не знал!) следует, что, например, вес  $P$

величиной 1 кГс (внесистемная единица силы, эквивалентная 9,806 Н в международной системе СИ [6]) на земной поверхности соответствует массе  $m$  тела (количеству вещества) величиной 1 кг. Таким образом, для землян, находящихся на нашей планете, измеренный на весах любой конструкции вес  $P$  вещества количественно равен массе  $m$  этого вещества. В космических же условиях, когда практически отсутствует ускорение  $g$  свободного падения тела, масса  $m$  этого тела является физической реальностью и может быть измерена специальным образом, а его вес  $P$  принимает нулевое значение и соответственно теряет свой физический смысл. На взгляд автора, поставить перед мировым сообществом в 17-ом веке такую простую и в тоже время фундаментальную научную задачу и решить ее мог только гениальный от природы человек. В этой связи очередным выдающимся научным достижением И. Ньютона следует считать введение им в науку **фундаментального понятия массы** физического тела. С помощью его (этого нового понятия) он дал точную и измеряемую основную физико-механическую характеристику материального объекта. И. Ньютон прекрасно понимал, что вес тела это результат воздействия на него силы тяготения Земли (в современном понимании он является результатом действия на массу тела гравитационного поля Земли). Поэтому он считал необходимым установить для физического тела внутренне присущую ему характеристику – **инерцию**. По этому вопросу он писал [1]: "Врожденная сила материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Эта сила пропорциональна массе тела". Масса тела как мера инерции тела используется и в современных учебниках по физике, сопротивлению материалов и механике. Так что в условиях невесомости (например, в условиях космоса) массу тела можно измерить по силе его инерции. Следующим новым понятием, введенным И. Ньютона в механику для описания динамики тел, является **фундаментальное понятие количества движения**. Он его определил как меру движения, пропорциональную массе и скорости физического тела [1]. И. Ньютон прекрасно знал векторный характер скорости тела и при практическом использовании своего определения количества движения всегда учитывал направление движения тела, формулируя для него правило параллелограмма скоростей. Потребности динамики поведения тел вынудили И. Ньютона ввести в науку важнейшее **понятие силы**. Он дает этому новому понятию следующее определение [1]: "Сила – это действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения". Это действие может быть осуществлено не только при непосредственном контакте с телом, но и при наличии расстояния между телом и силовым центром. Поэтому действие, производимое силовым центром по отношению к телу и приводящее к его притяжению к нему или отталкиванию от него, И. Ньютон называет **центростремительной силой** [1]. Величина центростремительной силы определяется согласно его научным положениям интенсивностью силового центра (например, массой Земли или Солнца) и выражается через **ускорение**, получаемое

тем или иным телом от действия этого силового центра. Заметим, что в современной физике и механике широко используется рассмотренное и введенное И. Ньютоном понятие количество движения, только называемое сейчас для движущегося тела "**импульсом**".

Следует обратить внимание читателя и на тот удивительный факт, что в разделе своих "*Математических начал натуральной философии*", связанном с небесной механикой, И. Ньютон в 1687 году дает краткое описание динамике полета искусственного спутника (в его написании "спутничка") вокруг Земли [1]. И это фактически за 270 лет до запуска в бывшем СССР 4 октября 1957 года первого в мире искусственного спутника нашей планеты! Я как ученый-электрофизик не перестаю удивляться величию таланта и разума И. Ньютона! В этом капитальном научном труде-трехтомнике И. Ньютона, являющимся первым в истории науки систематизированным курсом теоретической и небесной механики, содержались и три знаменитых закона движения физического тела (**законы Ньютона**), включающие: закон инерции тела (**первый закон**), закон пропорциональности действующей силы ускорению и массе тела или основной закон динамики (**второй закон**) и закон равенства сил действия и противодействия для взаимодействующих тел (**третий закон**). Здесь же И. Ньютоном приведен открытый им фундаментальный **закон всемирного тяготения**, устанавливающий силу взаимного притяжения двух тел. Исходя из данного закона, он разработал теорию небесных тел, объясняющую во вселенной движение планет, их спутников, комет и других космических тел. Это позволило ему создать общую теорию всемирного тяготения, согласно которой все небесные тела, находящиеся друг от друга на огромных расстояниях, связаны между собой силами тяготения в единую систему. И. Ньютон строго математически показал, что из открытого им закона всемирного тяготения вытекают открытые еще до него выдающимся немецким ученым-астрономом и математиком И. Кеплером три закона движения планет Солнечной системы (первые два закона Кеплера являются орбиты Марса, являющейся согласно им не кругом, а эллипсом, в одном из фокусов которого находится Солнце; третий закон Кеплера устанавливает, что отношение куба среднего расстояния от планеты до Солнца к квадрату периода ее обращения вокруг него является постоянной величиной [1]). Открытые законы механики дали возможность И. Ньютону объяснить движение Луны вокруг Земли и развить теорию, описывающую не чисто сферическую форму нашей планеты. В соответствии с этой его теорией получалось, что у своих северного и южного географических полюсов планета Земля "приплоснута" (ската), а на экваторе – "вздута" (расширина). Кроме того, им на основе закона всемирного тяготения была разработана теория морских приливов и отливов на Земле. Им была определена плотность планет Солнечной системы. Оказалось, что самые близкие к Солнцу планеты отличаются своей наибольшей плотностью. Для наблюдения за планетами Солнечной системы в 1668 году он создал первый зеркальный (отражательный) телескоп-рефлектор оригинальной конструкции (рис. 5). В данном зеркальном телескопе (телескопе Ньютона), установленном на одной из башен Тринити-колледжа (рис. 6), с

которой И. Ньютон ночью проводил свои регулярные астрономические наблюдения, для исключения явления aberrации и его влияния на качество изображения вместо стеклянной линзы было использовано вогнутое сферическое зеркало. Заметим, что сейчас этот вид телескопа широко используется в крупнейших обсерваториях мира. Отметим и то, что вначале своих физических исследований И. Ньютон солнечный свет считал потоком корпускул (частиц) и придерживался корпускулярной теории света (в физике она получила название корпускулярной теории света Ньютона). В своих более поздних исследованиях он не исключал и волновой природы дневного света. В 1675 году им была даже предпринята попытка создания компромиссной корпускулярно-волновой теории света. Говоря об оптике, необходимо указать и то, что именно И. Ньютон в 1666 году при помощи трехгранной стеклянной призмы впервые разложил белый свет на семь цветов (в световой спектр) и доказал тем самым сложность белого света (открыл новое в физике явление – **явление дисперсии света**). Им была открыта интерференция и дифракция света. Укажем здесь, что в 1701 году И. Ньютон изобрел пиromетр для определения температуры нагревшего тела.



Зеркальный телескоп, сконструированный и изголовленный Ньютоном

Рис. 5. Внешний вид уникального исторического экспоната зеркального телескопа, созданного И. Ньютоном [5]

Следует указать, что многие научные работы И. Ньютона из-за их резкой новизны, оригинальности и кажущейся сложности оставались непонятными для его современников. По этой причине он подвергался ожесточенной критике своих коллег – математиков, физиков, механиков и астрономов. Тем не менее, в 1703 году И. Ньютон был избран Президентом Лондонского Королевского общества (Академии наук Англии), а 1705 году ее величество королева Великой Британии Анна возвела Исаака Ньютона – сына простолюдина (фермера) в рыцарское достоинство и соответственно в дворянское звание. Это был на тот момент первый случай в английской истории, когда высокое звание рыцаря было присвоено ученыму за выдающиеся научные заслуги перед отечеством [5].

В истории науки и техники считается, что открытия, сделанные И. Ньютоном, что называется "носились в воздухе" и относились к актуальным научным проблемам того далекого от нас времени [1]. Над данными проблемами трудились многие ученые мира, приходя, в конце концов, к близким заключительным результатам. В этом тоже заключается одна из причин нежелания И. Ньютона оперативно печатать свои на-

учные труды, выход в свет которых почти для всех приводил к тяжелым спорам с другими учеными, в том числе и по вопросу их научного приоритета. Механика, математика, оптика и астрономия оказались в центре научных интересов и зачастую ожесточенных "сражений" великого по уму и по охвату решаемых научно-технических проблем И. Ньютона. Эти отрасли научных знаний уже созрели к тому времени для завершающих в них открытий и новых свершений. Всемирная история наук человеческого общества показала, что именно И. Ньютон и выполнил эту завершающую и присущую настоящему мастеру своего дела титаническую работу с исчерпывающей полнотой и научным блеском. Открытия и законы Ньютона стали основой высшей математики, классической физики, а также классической и небесной механики. Сделанные выдающиеся научные достижения этим великим английским ученым влились в прочный всемирный научно-технический фундамент указанных отраслей знаний и поныне служат нам на нашей планете для их дальнейшего развития и процветания.



Рис. 6. Внешний современный вид башни кембриджского Тринити-колледжа, с которой при помощи зеркального телескопа вел астрономические наблюдения И. Ньютон [5]

На основании открытых И. Ньютоном законов механики и закона всемирного тяготения он фактически создал новую физическую картину мира, базирующуюся на ньютоновской теории пространства и времени [2]. Пространство и время он считал абсолютными, о чем и постулировал в своих *"Математических началах натуральной философии"* [1]. С данным пониманием пространства и времени была связана и его (ニュートン) "концепция дальнодействия", соответствующая мгновенной передаче любого действия от одного физического тела к другому на расстояние через пустое пространство без помощи промежуточной среды и соответственно без материи. Отметим, что ньютоновская "концепция дальнодействия" весьма длительное время (до появления в 19-ом столетии экспериментальных и теоретических научных работ его выдающихся соотечественников-физиков М. Фарадея и Дж. Максвелла, о которых речь пойдет в последующем научно-историческом очерке, посвященном достижениям в классической электродинамике) господствовала в мировой науке.

Признавая гениальность И. Ньютона, потомки на его памятнике, установленном в Тринити-колледже

(напомним читателю, что английское слово "Triniti" переводится как "Троица"), высекли следующие величественные слова [5]: "Разумом он превосходил род человеческий". Отметим, что на надгробии И. Ньютона в Вестминстерском аббатстве (г. Лондон, Англия) имеется следующая надпись [3]: "Здесь покоятся сэр Исаак Ньютон, дворянин, который почти божественным умом первый доказал с факелом математики движение планет, пути комет и приливы океанов. Пускай же смертные радуются, что существовало такое украшение рода человеческого". Укажем, что в честь великих научных заслуг Исаака Ньютона перед человечеством международной научной общественностью единица силы в системе СИ была названа "ニュートン" (сокращенно Н).

### 3. ПОСЛЕДУЮЩЕЕ РАЗВИТИЕ МЕХАНИКИ

В 1736 году в г. Петербурге из печати в свет вышел известный двухтомник "Механики" или "Науки о движении, изложенной аналитически" (рис. 7) выдающегося немецкого (российского) механика и математика Леонарда Эйлера (1707-1783 гг.), являвшегося членом Петербургской Академии наук (позже она стала Российской Академией наук – РАН) [1].

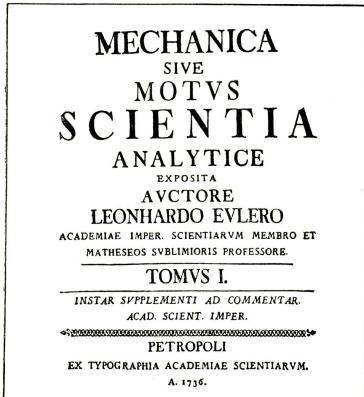


Рис. 7. Титульный лист "Механики" Л. Эйлера от 1736 г. [1]

В этом научном труде были впервые в дифференциальной форме записаны уравнения механики, а все инженерные расчеты механических конструкций проводились автором на языке математического анализа. Третий том "Механики" Л. Эйлера под названием "Теория движения твердых тел" был издан в 1765 году в г. Ростоке (Германия) [1]. В заключительном третьем томе "Механики" Л. Эйлер развел механику вращательного движения физического тела, введя при этом фундаментальное **понятие "главных осей"**, проходящих через центр инерции тела и по отношению к которым момент его инерции имеет экстремальное значение. Л. Эйлер как большой ученый оставил глубокий научный "след" в механике и физике. Список научных трудов (сочинений) этого одаренного ученого-энциклопедиста содержит около 900 названий [1].

В 1738 году в г. Петербурге была напечатана знаменитая "Гидродинамика" выдающегося швейцарского (российского) математика и механика Даниила Бернулли (1700-1782 гг.), содержащая известное **"уравнение Бернулли"** для стационарного течения идеальной жидкости в поле консервативных сил [1,6]. Укажем, что в 1743 году из печати вышел "Трактат по динамике" выдающегося французского математика

и физика Жана Даламбера (1717-1783 гг.), в котором был сформулирован известный **"принцип Даламбера"** [1,2]. В 1788 году (фактически через 100 лет после опубликования И. Ньютона своих "Математических начал натуральной философии") была издана "Аналитическая механика" выдающегося французского механика и математика Жозефа Лагранжа (1736-1813 гг.), в которой еще в большей степени, чем в указанном печатном труде Л. Эйлера, прослеживается эволюция математических методов классической механики [1]. Здесь необходимо отметить, что еще в 1717 году Иоганном Бернулли (1667-1748 гг.) в области механики (статики) был открыт важный принцип возможных перемещений (Ж. Лагранж называл его принципом виртуальных скоростей) [1]. Этот принцип привел к появлению в механике (динамике) нового **принципа наименьшего действия Монпертию – Эйлера** (1740 год), восходящего еще к знаменитому принципу французского математика и физика Пьера Ферма (1601-1665 гг.) [2,6]. С учетом научных достижений своих известных предшественников в области классической механики Ж. Лагранж (рис. 8), основываясь на упомянутых принципах Даламбера и Монпертию – Эйлера, построил в своем вышеуказанном сочинении законченную систему аналитической механики, имеющую не только большое научное значение для самой механики как отрасли знаний, изучающей перемещение в пространстве и равновесие материальных тел под действием приложенных к ним сил, но и выходящую по своей применимости за пределы теоретической и прикладной механики. В 1807 году в двухтомном труде "Курс лекций по натуральной философии и механическому искусству" известный английский ученый Томас Юнг (1773-1829 гг.) обобщил результаты своих расчетно-экспериментальных работ по деформации сдвига и ввел новую числовую характеристику упругости при растяжении и сжатии тел – так называемый **модуль Юнга**, широко используемый и поныне в сопротивлении материалов [6]. Роль высшей математики и ее научных методов в развитии механики огромна. Поэтому можно уверенно говорить о том, что современная классическая механика является научной дисциплиной, построенной на достаточно сложном математическом аппарате. Из этого положения студенты-старшекурсники технических университетов и молодые научные работники, трудящиеся в технических областях знаний, должны делать соответствующие выводы и активно заниматься самообразованием и повышением уровня своих знаний.

Согласно истории техники 1733 год ознаменовался изобретением английским инженером Джоном Уайаттом (1700-1766 гг.) первой прядильной машины [1]. Считается, что это выдающееся техническое изобретение послужило началом промышленного "переворота" в Англии. Ткацким фабрикам стали нужны универсальные двигатели, приводящие в механическое действие прядильные машины. В России над этим важным практическим вопросом стал трудиться известный русский механик Иван Иванович Ползунов (1728-1766 гг.) [1]. Этим умельцем-самородком была построена пароатмосферная машина непрерывного действия с автоматическим впуском и выпуском в ее рабочем органе водяного пара и инжектированием (впрыскиванием) в ее соответствующие части холодной воды для образования разряжения (рис. 9). Уни-

версальный **паровой двигатель** с отделением рабочего цилиндра от водяного конденсатора и непрерывным механическим действием был создан выдающимся английским изобретателем-механиком Джеймсом Уаттом (1736-1819 гг.) [1]. Так на нашей планете наступила эра "водяного пара". Паровые двигатели, благодаря выдающимся техническим разработкам Дж. Уатта (рис. 10), стали массовым образом применяться не только на фабриках и заводах для обеспечения работы различных по назначению станков и механизмов, но и на транспорте – пароходах и паровозах для приведения в движение их механических частей. Роль статических и динамических расчетов рабочих элементов (узлов) при разработке этой техники и соответственно механики в целом существенно возросла.



Рис. 8. Выдающийся французский механик и математик Жозеф Лагранж (1736-1813 гг.)

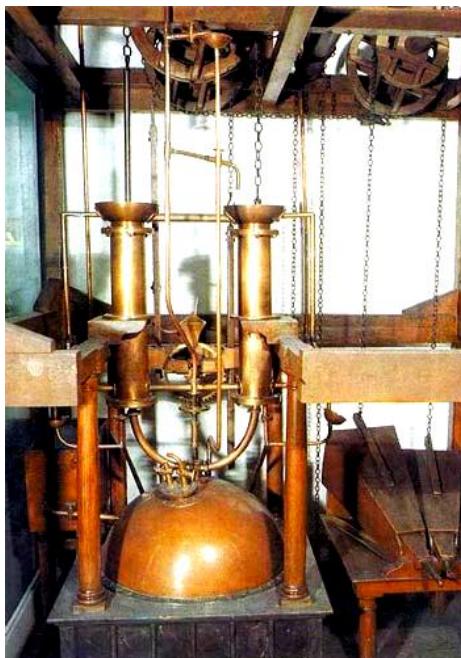


Рис. 9. Макет паровой машины российского изобретателя-механика И.И. Ползунова (современный экспонат краеведческого музея г. Барнаула, Российская Федерация) [9]

Укажем здесь важное для практики научно-техническое достижение в области ламинарного течения жидкости с известной вязкостью по нашедшей широкое применение в промышленности и быту круглой трубе, определяющее при заданной разности давлений на концах трубы известной длины и величине ее радиуса объем жидкости, протекающей через поперечное

сечение данной трубы за единицу времени (**формула Пуазейля**, 1840 год) [6]. В этом ряду научных достижений 19-го столетия находится и определение силы внутреннего трения (силы вязкости) при ламинарном обтекании жидкостью движущегося в ней с заданной скоростью тела шарообразной формы (**закон Стокса**, 1851 год) [6]. До сих пор в механике жидкостей (газа) при оценке характера их течения (ламинарного или турбулентного) по трубопроводам различной формы специалисты пользуются такой безразмерной величиной как **число Рейнольдса** (1883 год), связывающее между собой вязкость, плотность и скорость потока жидкости (газа) и характерный поперечный размер обтекаемого этим потоком тела [6].

Применение еще первооткрывателем закона всемирного тяготения И. Ньютона этого закона к описанию движения небесных тел и определению формы этих тел показало, что небесные тела должны иметь геометрическую фигуру, определяемую как вращением их масс вокруг своих осей, так и взаимным притяжением частиц данных масс тел по указанному закону. Согласно известной гипотезе каждая планета Солнечной системы и вероятно иных систем и галактик нашей необъятной вселенной первоначально находилась в жидким состоянии [1,8]. В этой связи задача о форме равновесия круговым образом вращающегося жидкого тела приобрела в небесной механике важное научное и мировоззренческое значение. Ранее нами было указано, что исследования И. Ньютона относительно формы вращающейся Земли показали, что под влиянием центробежных сил и сил притяжения ее вращающаяся жидккая масса должна принимать форму шара, скатого у своих географических полюсов. Такая геометрическая фигура называется эллипсоидом вращения или эллипсоидом Маклорена, названным в честь шотландского ученого К. Маклорена, впервые математически доказавшего в середине 18-го века то, что эллипсоид вращения действительно является равновесной фигурой вращающегося жидкого тела [6, 8]. Долгое время ученые-механики считали эллипсоиды вращения единственными геометрическими фигурами равновесия вращающейся жидкости.

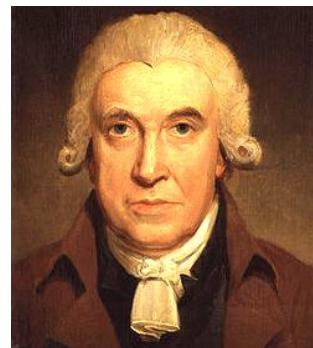


Рис. 10. Выдающийся английский изобретатель-механик Джеймс Уатт (1736-1819 гг.) [10]

В 1883 году выдающимся французским математиком и механиком Анри Пуанкаре (1854-1912 гг.) была опубликована серия статей о равновесии вращающейся жидкости, в которых этим ученым была рассмотрена **фундаментальная задача динамики** указанной нами **жидкости**, сводящаяся к сложному нелинейному интегральному уравнению. Следует за-

метить о том, что, несмотря на большие успехи современной математической физики, даже в настоящее время отсутствует общая теория аналитического решения подобных уравнений. Поэтому удивительными выглядят те научные успехи, которые были достигнуты А. Пуанкаре в г. Париже при рассмотрении этой передававшейся в течение полутора веков от одного поколения ученых к другому физико-математической задачи. Им теоретически были установлены новые фигуры равновесия вращающегося жидкого тела, отличающиеся от эллипсоидальных. Среди этих геометрических фигур были даже грушевидные, со временем распадающиеся на два неравных тела [8]. А. Пуанкаре понимал, что сделанные им выводы о фигурах равновесия вращающегося жидкого тела применительно к небесным телам справедливы лишь в случае устойчивости этих геометрических фигур. Только в этом механическом случае они могут сохраняться неограниченно долго. На то время оценка устойчивости механических систем базировалась исключительно на принципе Лагранжа, согласно которому устойчивое равновесие физического тела характеризуется наименьшей величиной его потенциальной энергии. **Принцип Лагранжа** оказался бессильным при решении проблемы устойчивости фигур равновесия вращающейся жидкости из-за невозможности учета влияния на нее (устойчивость) гироскопических сил, возникающих в такой жидкости. А. Пуанкаре вышел из этого сложного положения путем введения для каждой возможной фигуры равновесия вращающегося жидкого тела коэффициента устойчивости, принимающего некоторые численные значения. В случае, когда эти коэффициенты принимают положительные значения, условие устойчивости по Пуанкаре выполняется. При отрицательных же значениях введенных А. Пуанкаре коэффициентов устойчивости равновесные формы жидкого тела становятся неустойчивыми.

С 1882 года в далеком г. Петербурге независимо от А. Пуанкаре к решению задачи устойчивости эллипсоидальных форм равновесия вращающейся жидкости подключился молодой и в будущем выдающийся российский математик и механик Александр Михайлович Ляпунов (1857-1918 гг.) [8]. Полученные А.М. Ляпуновым (рис. 11) результаты приближенном решении указанной задачи, защищенные им в 1885 году в своей магистерской диссертации "*Об устойчивости эллипсоидальных форм равновесия вращающейся жидкости*", оказались по существу аналогичными научным данным, полученными несколько позже в г. Париже упомянутым А. Пуанкаре. Интересно отметить, что с 1887 года А.М. Ляпунов начал преподавание аналитической механики в Харьковском практическом технологическом институте, ставшим впоследствии Харьковским электротехническим институтом (ХЭТИ, 1930 год) и позже Харьковским политехническим институтом (ХПИ, 1950 год) [11]. Отметим, что после избрания в 1901 году А.М. Ляпунова в РАН в механико-математических исследованиях нового академика рассматриваемая нами "вековая" проблемная задача динамики жидких тел вращения получила свое полное и точное решение [8]. До наступления этого времени в 1892 году А.М. Ляпуновым, работавшим на кафедре механики Харьковского университета, была успешно защищена в Московском университете им. М.В. Ломоносова доктор-

ская диссертация на тему "*Общая задача об устойчивости движения*". В данной научной работе был представлен общий метод для решения задач об устойчивости движущихся тел. Выдающейся научной заслугой А.М. Ляпунова является создание строгой **теории устойчивости равновесия и движения** механических систем, определяемых конечным числом параметров [12]. С математической стороны вопрос об устойчивости движения тела А.М. Ляпуновым был сведен к исследованию предельного поведения решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику его движения, при стремлении соответствующих независимого переменного к бесконечности. Устойчивость движения тела (системы) определялась А.М. Ляпуновым по отношению к возмущениям начальных данных движения.



Рис. 11. Выдающийся российский математик и механик Александр Михайлович Ляпунов (1857-1918 гг.) [12]

Заметим, что до фундаментальных работ А.М. Ляпунова в области механики вопросы об устойчивости движения тел обычно решались по первому приближению, при котором отбрасывались все нелинейные члены соответствующих дифференциальных уравнений. Причём, при таком приближенном подходе учеными не выяснялась математическая законность подобной линеаризации уравнений движения физических тел. Следует указать, что докторская диссертация и последующие работы А.М. Ляпунова в рассматриваемой области механики содержали целый ряд фундаментальных математических результатов, касающихся теории обыкновенных дифференциальных уравнений как линейных, так и нелинейных [13].

Нашего внимания заслуживают важные достижения в области движения материальных тел с переменной массой, полученные известными российскими учеными-механиками Иваном Всеволодовичем Мещерским (1859-1935 гг.) и Константином Эдуардовичем Циolkовским (1857-1935 гг.), ставшим "отцом" и первым теоретиком советской космонавтики. Это касается, прежде всего, формулировки И.В. Мещерским знаменитого уравнения для движения тела с изменяющейся в процессе его перемещения массой (*уравнение Мещерского*, 1894 год) и получения К.Э. Циолковским известной формулы, связывающей при прямолинейном движении тела с заданной скоростью без учета влияния внешних сил сопротивления его первоначальную и текущую массы (*формула Циолковского*, 1895 год) [6]. Следует заметить, что указанные теоретические разработки российских ученых-механиков 19-го столетия нашли свою практическую реализацию при создании и развитии в бывшем СССР ракетно-космической техники.

Здесь нельзя не упомянуть о важном достижении известного российского ученого-механика Николая Егоровича Жуковского (1847-1921 гг.), который в своем труде "Курс теоретической механики" представил аналитическую зависимость величины подъемной силы, действующей на равномерно движущееся в идеальной жидкости крыло бесконечного размаха и заданной длины, от циркуляции вектора скорости жидкости относительно крыла, плотности и скорости невозмущенного потока жидкости (**формула Жуковского**, 1904 год) [6, 14]. Данная формула Н.Е. Жуковского (рис. 12) легла в основу аэродинамического расчета летательных аппаратов и мирового самолетостроения. Выбором же профиля крыла самолета авиаконструкторы добивались получения для него наибольшей величины подъемной силы и наименьшей силы лобового сопротивления при полете самолета или иного аппарата в воздушном пространстве.

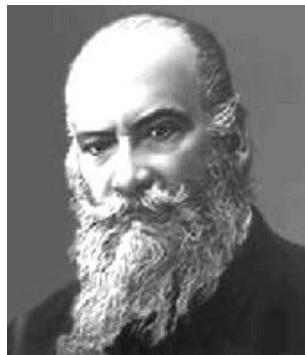


Рис. 12. Известный российский ученый-механик Николай Егорович Жуковский (1847-1921 гг.) [14]

Для полноты научно-технической "картины", раскрывающей плодотворную деятельность этого ученого-механика, укажем, что в 1876 году Н.Е. Жуковский защитил диссертацию на степень магистра прикладной механики по теме "Кинематика жидкого тела". В ней соискателем было изучено распределение скоростей частиц жидкости. Поэтому, по сути, эта работа являлась введением в гидромеханику. В 1882 году им была успешно защищена в Московском университете им. М.В. Ломоносова докторская диссертация "О прочности движения". С 1887 г. он стал штатным профессором Императорского московского технического училища (позже это учебное заведение стало Московским высшим техническим училищем им. Н.Э. Баумана, а ныне – Московским государственным техническим университетом им. Н.Э. Баумана) по кафедре аналитической механики. С 1890 года проф. Н.Е. Жуковский начал заниматься теорией полета аппаратов тяжелее воздуха. В связи с этим он писал [14]: "Человек не имеет крыльев и по отношению веса своего тела к весу мускулов в 72 раза слабее птицы. Но думаю, что он полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума". Какие замечательные провидческие слова и мысли! Основные научные работы Н.Е. Жуковского посвящены гидроаэродинамике и механике полета самолетов. Однако он выполнил и ряд оригинальных исследований прочности элементов механических конструкций: решил важную задачу о распределении давления на резьбовых нарезках винта и гайки; изучил прочность велосипедного колеса; рассмотрел колебания и устой-

чивость паровоза на рессорах; исследовал устойчивость элементов конструкций самолетов.

Большой научно-технический вклад в теорию и практику всемирной механики внес выдающийся российский ученый-математик, механик и инженер-кораблестроитель Алексей Николаевич Крылов (1863-1945 гг.). В 1890 году мировую известность приобрёл научный труд А.Н. Крылова "**Теория качки корабля**", явившийся первым всеобъемлющим теоретическим трудом в этой области [14]. Здесь следует указать, что в 1898 году А.Н. Крылов (рис. 13) за данную теорию был награждён золотой медалью Британского общества корабельных инженеров. Причём, это был первый случай в истории данного авторитетного общества, когда подобной медали удостаивался иностранец.

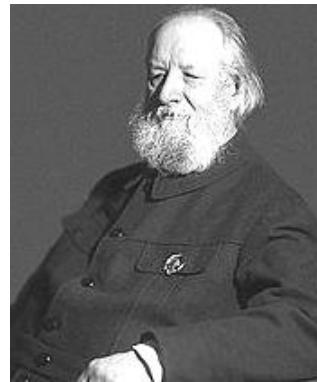


Рис. 13. Выдающийся российский математик, механик и кораблестроитель Алексей Николаевич Крылов (1863-1945 гг.) [14]

Продолжая работы в области кораблестроения, А.Н. Крылов создал теорию демпфирования (умирения) бортовой и кильевой качки корабля. Он первый предложил гироскопическое демпфирование (упокоение) бортовой качки корабля, что сегодня является наиболее распространённым способом умирения его бортовой качки [14]. С 1900 года А.Н. Крылов действительно трудился над вопросами плавучести корабля. Результаты этой работы стали классическими и до сих пор широко используются в мировом кораблестроении. В морском деле и сейчас широко используются его знаменитые **таблицы непотопляемости корабля** [14]. Отметим, что А.Н. Крылов знаменит своими работами по гидродинамике, в том числе и по теории движения корабля на мелководье. Он был первым, кто смог объяснить и рассчитать значительное увеличение гидродинамического сопротивления корабля при его плавании на небольших глубинах. Он разработал теорию единичных волн в области кораблестроения. Он решил основную задачу теории мостов, связанную с расчетом механических напряжений, вызываемых в тяжелой балке движущейся по ней безмассовой силой (1905 год). Выполнил на основе метода начальных параметров расчет балок на упругом основании (1930 год). Он изучил устойчивость сжатых стержней и показал, что точное дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня может быть проинтегрировано в эллиптических интегралах, которые табулированы с высокой точностью (1931 год). В области математики он достиг больших успехов в разработке проблемы собственных значений функций при вычислении коэффициентов характеристического полинома задан-

ной матрицы (этими работами в вычислительную математику было введено новое понятие – "*подпространство Крылова*", 1931 год). Вычислительный метод, основанный на подпространстве Крылова, находит применение и в современной практике при минимизации вычислительных затрат. В 1914 году Московский университет им. М.В. Ломоносова по представлению профессора Н.Е. Жуковского присудил А.Н. Крылову степень почетного доктора (*doctor honoris causa*) прикладной математики. Заметим, что именно А.Н. Крылов в 1915 году перевёл на русский язык трехтомник знаменитых "*Математических начал натуральной философии*" И. Ньютона, о кратком содержании которых, ставших основой теоретической механики, речь шла чуть выше. В 1916 году А.Н. Крылов был избран действительным членом РАН. В настоящее время РАН ежегодно присуждает прославившимся своими достижениями ученым премию имени академика А.Н. Крылова "*За выдающиеся работы по использованию вычислительной техники в решении задач механики и математической физики*".

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя определенные краткие итоги рассмотренному в этой работе научно-историческому материалу, касающемуся истории становления и развития в мире классической механики в период 17-20 веков, следует отметить, что:

1. Ньютоновские законы динамики и закон всемирного тяготения в 17-ом столетии стали основой как классической механики, так и небесной механики, изучающих движение макроскопических тел.

2. Последующее после работ И. Ньютона теоретическое развитие классической механики многими выдающимися учеными-механиками, математиками и физиками мира привело к настоящему расцвету этой области знаний человечества, с проявлением практического применения научно-технических результатов которой мы сталкиваемся ежедневно и ежечасно как в нашем быту, так и на производстве при прямом и косвенном использовании нами разнообразных технических приспособлений и сооружений, машин и механизмов.

3. Не одно столетие потребовалось человечеству для того, чтобы убедиться в том, что законы классической механики не универсальны и что они нуждаются в уточнении для микроскопических тел, движущихся с большими скоростями. Данное уточнение привело к рождению в мировой науке новой отрасли знаний – волновой механики, описывающей квантованное вероятностное поведение и движение микроскопических тел (частиц) с до- и релятивистскими скоростями.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
  2. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
  3. Скляренко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.
  4. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
  5. Климов А.А. Большая книга знаний. – Харьков: Веста, 2010. – 160 с.
  6. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
  7. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 1: Открытие периодического закона химических элементов // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №2. – С. 3-9.
  8. Тяпкин А.А., Шибанов А.С. Пуанкарэ / Серия "Жизнь замечательных людей". – М.: Молодая гвардия, 1979. – 415 с.
  9. <http://www.barnaul-altai.ru/info/barnaul/people/polzunov.php>.
  10. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Уатт,\\_Джеймс](http://ru.wikipedia.org/wiki/Уатт,_Джеймс).
  11. Неронова Е. Александр Михайлович Ляпунов / Газета "Політехнік" №12 (2259) від 31.05.2007 р. (м. Харків), 2 с.
  12. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Ляпунов,\\_Александр\\_Михайлович](http://ru.wikipedia.org/wiki/Ляпунов,_Александр_Михайлович).
  13. <http://ricolor.org/history/eng/tochn/lyapunov/>.
  14. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Крылов,\\_Алексей\\_Николаевич](http://ru.wikipedia.org/wiki/Крылов,_Алексей_Николаевич).
- Bibliography (transliterated):** 1. Kudryavcev P.S. Kurs istorii fiziki. – M.: Prosveschenie, 1974. – 312 s. 2. Hramov Yu.A. Istorya fiziki. – Kiev: Feniks, 2006. – 1176 s. 3. Sklyarenko V.M., Syadro V.V. Otkrytiya i izobreteniya. – Har'kov: Vesta, 2009. – 144 s. 4. Bol'shoj illyustrirovannyj slovar' inostrannych slov. - M.: Russkie slovari, 2004. - 957 s. 5. Klimov A.A. Bol'shaya kniga znanij. – Har'kov: Vesta, 2010. – 160 s. 6. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tar takovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 7. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihsya dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 1: Otkrytie periodicheskogo zakona himicheskikh `elementov // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – №2. – S. 3-9. 8. Tyapkin A.A., Shibanov A.S. Puankare / Seriya "Zhizn' zamechatel'nyh lyudej". – M.: Molodaya gvardiya, 1979. – 415 s. 9. <http://www.barnaul-altai.ru/info/barnaul/people/polzunov.php>. 10. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Uatt,\\_Dzheims](http://ru.wikipedia.org/wiki/Uatt,_Dzheims). 11. Neronova E. Aleksandr Mihajlovich Lyapunov / Gazeta "Politehnik" №12 (2259) vid 31.05.2007 r. (m. Harkiv), 2 s. 12. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Lyapunov,\\_Aleksandr\\_Mihajlovich](http://ru.wikipedia.org/wiki/Lyapunov,_Aleksandr_Mihajlovich). 13. <http://ricolor.org/history/eng/tochn/lyapunov/>. 14. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Krylov,\\_Aleksej\\_Nikolaevich](http://ru.wikipedia.org/wiki/Krylov,_Aleksej_Nikolaevich).

Поступила 29.08.2011

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

НИПКИ "Молния"

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47

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

Baranov M.I.

**An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 11: classical mechanics.**

A brief scientific and historical essay on formation and development, in the period of the 17th through 20th centuries, of classical mechanics, its scientific achievements and their applications is given.

**Key words – history, classical mechanics, achievements.**

## ГЕНЕЗИС ВИНАХІДНИЦТВА

*Приведено генезис винахідництва від середньовіччя до сьогодення та прикладів винаходів інженерної кафедри. Стоїть завдання перед вченим: велику кількість фактів, явищ в будь-якій області знань слід упакувати в загально зрозумілі закони, алгоритми або формули.*

*Приведен анализ развития изобретательства от средневековья до настоящего времени и примеров изобретений на инженерной кафедре. Стоит задача перед учеными: большое разнообразие фактов, явлений следует упаковать в общие понятные законы, алгоритмы или формулы.*

**Вступ.** Генетика і біологія розвитку можуть запропонувати досить потужний резерв для перебудови сучасного винахідництва – нову царину знань, як генезис винахідництва.

**Актуальність проблеми.** Винахідницький генезис – це сукупність відомостей, необхідний педагогам, дослідникам та конструкторам будь-яких спеціальностей для того, щоб усвідомити і використовувати неминучість глибокої різноманітності людей, різноманітності учнів в будь-якому колективі, з якими доводиться мати справу, вивчати методику розв'язання винахідницьких задач.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Найбільший розвиток створення видатних мислителів і геніїв отримано у США: крім атомної енергетики в ХХ столітті, модернезуючої комп'ютеризації в теперішній час та впровадження нанотехнологій у виробництво. У словнику США професій налічується понад 40 тисяч професій, розділених на 114 груп в 22 областях діяльності. Вивчаючи окремі здібності і особливості, оцінюючи їх, можна було за допомогою тестів прийти до оцінки "сумарного інтелекту", або сумарні оцінки обдарованості [13]. Ця сумарна оцінка отримала назву "Ай-Кью" за першими літерами англійських слів Intelligence Quotient – IQ. Середнє значення IQ, виведене в підсумку тестуванням величезної кількості людей, було прийнято за 100, тобто – це норма, зазвичай граничними є 160-180 балів. Нижче 80 – це вже розумова відсталість різних ступенів, 80 – нижня межа норми. Тести можуть досить точно підказати, де, в якій області можна реалізувати себе максимально. Якби об'єктивні оцінки тестів лежали в основі сходження на найвищі сходинки в адміністративному, управлінському апараті, в отриманні переважних позицій в науці, винахідництві, то протекціонізм, та інші способи продукування кар'єри не допомагали б займати не відповідні місця людям, які не володіють для цього потрібними якостями. Середній IQ для студентів які закінчили коледж – для психологів – близько 132, гуманітаріїв – 130, для агрономів, медиків, філологів, інженерів і біологів – 127, економістів, геологів, педагогів – 123, менеджерів – 122; для докторів філософії середній рівень IQ – 133, для фізиків – 138, хіміків – 135. Зараз Україна переживає впровадження Болонського процесу у освітній процес, де також повинно використовуватись тестування [3]. Винахідницький дар єдиний і своєрідний, специфічний, проявляється дуже рано, спрямований лише на здійснення мети. Технічне дарування пов'язано з особливим рівнем технічної проникливості, творчою фантазією, яскраво зорової пам'яттю, з просторовою уявою, здатністю використовувати все, що вже

зроблене, тобто запозичувати "вузли" і принципи [1-5]. Винаходи, які наведені показують шляхи вирішення творчих завдань у механізації тваринництва: машинне доїння, охолодження молока, гідроідалення відходів, заготівлі, приготування та роздавання кормів, застосування обчислювальної техніки [4-6].

**Мета роботи.** Метою роботи є розроблення теоретико-методологічних і методико-прикладних засад становлення та розвитку системи винахідництва. Людству потрібні творчі та геніальні люди в масі областей діяльності для вирішення всіх нових проблем. Але лише мала частина геніїв, які народжуються на світ, дійсно проявляє й розвиває свою геніальність. Відомі слова Дідро: "Геній падає з неба. І на один раз, коли він зустрічає ворота палацу, доводиться сто тисяч випадків, коли він падає повз". Необхідно знати які палаці потрібні для геніїв.

**Матеріал і результати дослідження.** Матеріалом дослідження є закономірності генези та еволюції інновацій в глобальному середовищі творчої діяльності людства. Для того щоб вижити і залишити потомство, первісні люди, повинні були вже володіти енциклопедичними знаннями, величезними даруваннями, щоб правильно розподіляти, систематизувати ті чи інші явища і події, повинні були мати ще й здатність блискавично мобілізувати і пам'ять, і кмітливість, і знання. Помилка могла коштувати життя: необхідно перемогти хижаків або вислизнути від надто небезпечних, як добувати кожен день їжу, а отже, знати, які рослини поживні, які отруйні, які і при яких хворобах цілющі, знати звички у сотень видів оточуючих тварин. Талановитий мозок для дикунів і наших більш цивілізованих був необхідний засіб для виживання. Індіанці Америки до прибууття європейців не тільки культивували кукурудзу, боби і земляні горіхи, картоплю, від них виходять вклади в фармакопею – крім хініну вони, зрозуміло, нічого не знаючи про існування вітаміну С, добре знали протицинкові рослини, аж до деяких мохів. Вони мали власну, досить правильну класифікацію рослин. Календар майя щодо точності перевершував європейські календарі XVII ст. Згодом, множення і ділення за допомогою римських цифр вимагало від обчислювача мало не вищої освіти, але за допомогою арабських цифр ці операції доступні початківцеві школяреві. Індивідуальний підхід повинен починатися відразу ж, по народженні. Приклади раннього прояву обдарованості та геніальності: Ампер, ще не знаючи цифр і алфавіту, обчислював за допомогою камінців. Ньютон вже в молодих класах виявив здібності у виготовленні повітряних зміїв. Список людей, які зробили великі відкриття у віці до 21 років: Е. Дарвін написав "Зоономію" в 18 років. Б.

Паскаль в 19 років винайшов лічильну машину. С. Кольт винайшов в 18 років револьвер, а в 19 сконструював револьвер та рушницю. П. Кюрі в 20 років зробив перші відкриття в хімії. Галілей відкрив правило коливання маятника в 17 років. Г. Кірхгоф в 21 рік встановив два правила для електричного кола, що носять його ім'я. Найбільше відкриття Р. Декарта – "декартові координати" – було зроблено ним у 17-річному віці. І лише сукупність оптимальних зовнішніх умов, що включає не тільки дитячий період, але і період подальшого розвитку людини і вродженої обдарованості може дати генія. Фактор довголіття багатьох геніїв чітко виступає у формі геніальності. Одним із доказів його значення є довголіття багатьох у стійкості творчості по відношенню до "паспортно-старечого" віку, про що говорять приклади: Мікеланджело в 73 роки стає архітектором собору Святого Павла; архітектор О. Бекетов перетворює Харків у високо архітектурне місто. Він пише в статті "Мої стимули к работе": "Непрерывная работа составляет основной закон искусства, как и закон жизни", так він працює практично до самої смерті. І.П. Павлов творив до 87. У всіх цих випадках характерно, що старіло тіло, але творчий початок зберігався. Деякі інтелектуальні функції навіть у довгожителів-творців, безумовно, слабшають, однак інші досягають вищого розквіту, розвивається вища форма розуму – мудрість. П. Мебіус в своїх творах показує, що середня тривалість життя 100 найбільших математиків, астрономів і фізиків-математиків склала 72 роки. А. Страдіварі досяг вершин, коли йому було 65-75 років, і останню скрипку він закінчив, коли йому було 92 роки. Отже, високе довголіття геніїв – факт показовий. Н. Тесла (1856-1943рр) винахідник в галузі електро- і радіотехніки розробляв і патентував свої рішення на майбутні століття [10, 11]. Приклади найрізноманітніших захоплюючих пристрастей, що вимагають повної самовіддачі, невичерпні. Вони то і служать основною причиною геніальніої ефективності. Продукт особистого, індивідуальної творчості еквівалентний продукту праці сотень тисяч людей і цей продукт його праці епохальний. Працюючи над скульптурою, архітектурною спорудою, математичним або фізичним завданням, приладом, планом кампанії, рукописом промови, статті або книги, мудрій нехтує всім, не безумовно необхідними. Студент Г. Альтшуллер, ще навчаючись у МВТУ ім. Баумана пропонує теорію "ТРИЗ" а потім "Алгоритм рішення изобретательских задач – АРИЗ". Всяка творча робота вимагає солідного фундаменту професійних знань і умінь, широкого кругозору і суверої послідовності думок. За визначенням, яке дає Чернишевський, що талант повинен виразити те, що багато хто розумів, але не змогли сформулювати, геній же повинен зрозуміти, уявити те, що до нього не розуміли. Так на основі кілець Мебіуса на інженерній кафедрі В.І. Грицаенко, А.А. Задоржний, М.В. Кізлик, В.В. Ковальов, Г.Д. Гайдамака створили "Змішувач", за що отримали почесні знаки "Ізобретатель СССР", який вперше впроваджений в атомній енергетиці [6]. Якщо в явищі прихована істина, до неї треба додуматися, її потрібно відкрити та показати, тобто потрібна напруга творчої думки. На основі уявлення про безмежність потенційних можливостей людського розуму, необхідна розробка методів стимуляції цих потенцій, методів У людини в

індивідуальному розвитку є деякі "критичні" моменти, під час яких найбільше справляють враження певні дії зовнішнього середовища. Це іноді довічно, але завжди на довгий час визначає багато мотивів діяльності людини, його цілі та ціннісну шкалу. Македонський був генієм, володів потужною розумовою та фізичною енергією. Але і вчителем його був Аристотель. Ноосфера – сфера розуму, по В.І. Вернадському, – дозволяє мільйонам молоді завдяки книгам, радіо, телебаченню, інтернету ставати "учнями Аристотеля". Інформаційне століття ставить і викладачів і учнів перед завданням навчитися не лише пізнавати готові істини, але їх зіставляти і узагальнювати. Якщо, по-суворовських, "каждый солдат должен знать свой маневр", то по-генетичному: кожна людина повинна знати свій талант, чим раніше – тим краще. Інакше індивідуальний шлях не визначиться і не виникне головне, те, що І.П. Павлов позначив терміном "рефлекс цели", тобто цілеспрямованість, націленість, самовіддане прагнення до вирішення поставленого завдання. Мета – це диференційна змінна, яка вносить новий зміст у масу наче б то суперечливих даних про мінливість розвитку інтелекту, а ця змінна в той же час виростає з емпіричних даних Залежно від змісту мети слідувала різноманітність діяльності – підприємництво, отримання освіти, творча активність або – гангстеризм, мафія, кримінал. Мета ставиться в описі винаходу та повторюється у формулі винаходу. Після відображення аналогів та прототипу ставиться задача винаходу, теж окремим абзацом. А потім – рішення поставленої задачі, що повторюється у формулі винаходу. Вражуюча розумова енергія проявляється при наявності рефлексу мети, при завзятій думці, однодумка в будь-якій справді творчої школи – наукової, мальовничої, скульптурної, літературно-поетичної. Так, за словами Ньютона, він прийшов до закону всесвітнього тяжіння лише у результаті безперервного, невідривного, зосередженого роздуму над цим питанням. Менделєєв багато днів роздумував над закономірностями властивостей елементів, до того як вони у нього "сошлись в таблицу". Неймовірна, цілеспрямована тяга до діяльності у що б то не стало більш ніж що-небудь інше характерна для видатних людей. Мікеланджело, Рафаель, Рубенс, досягнувші слави і багатства, не захлинаються в них, але продовжують служити своїй справі: геній сам породжує собі працю, внутрішньо вимушено, постійно, властиву великим ученим. Галілей вирішив, що краще залишитися живим і працювати далі потай, ніж гинути через дурнів. Всесвітньо відомі вчені Вавілов М.І., Мендель Г., Морган Т.Г., Уотсон Дж.Д., Ефроімсон В.П. та багато других створили і розвинули науку генетику до її практичного використання [8, 9, 12, 13]. Іноді мета, до якої покликаний геній, не відразу виявляється побаченої. Зате, знайшовши свою дорогу, наполегливо йшли вони по ній до кінця. Саме це протиріччя і є тим рушієм, що не залишає їх ні на хвилину в спокой, спонукає на всі нові подвиги праці [6, 10, 11]. А. Ейнштейн ("Фізика і реальність") пише: "Наше мислення протікає, в основному, минаючи символи і до того ж протікає несвідомо". Всі зовнішні враження існують для них лише в якості відправних пунктів для переробного абстрагування, екстрагування, ідеалізування, деформування. Ейнштейнівська формула  $E = mc^2$ ,

де  $m$  – маса,  $c$  – швидкість світла, що звела в кілька типографських знаків перехід маси в енергію.

Як і "Нарисна геометрія" стала мистецтвом для інженерів, так і вираз для електродвигунів змінного струму:

$$n_c = \frac{60f}{p},$$

де  $n_c$  – синхронна швидкість магнітного поля статора,  $f$  – частота змінного струму,  $p$  – кількість пар полюсів кожної обмотки статора.

Все це дає один із безлічі інструментів мислення, про що звів у таблицю рішення винахідницьких задач Г.С. Альтшуллер [1, 2].

Цілеспрямованість, одержимість генія, незвичність його ціннісних координат не вкладається в голові у обивателя. В удаваного генія відсутній заклик до найвищого, і він слідує мирськими шляхами. Видно рефлекс мети у всесвітньо відомих винахідників Едісона, Корольова, Курчатова, Патона, Н. Тесла, Форда та багатьох інших. Доброзичливий, розуміючий педагог, який добре знає вихованця, його можливості, його проблеми, має навчитися розпізнавати в молоді ті відмінності, на які і повинні спиратися виховання і навчання. Багато підлітків, молодих і дорослих людей застрюють на шкалах пристосуванства, а точніше кажучи, користолюбства, кар'єризму. Всі ми по-різому сприймаємо оточуючий нас світ, по-різому сприймаємо інформацію: одним легше на слух, іншим потрібно побачити; біля одних пам'ять вимагає строгих визначень і "залізної" логіки, в інших – відчуттів, образів, асоціацій [7, 9, 12]. Саме інноваційний менеджмент показує шляхи вирішення проблеми: управління інноваційними процесами; вибір інноваційної стратегії; вибір і реалізація проектів; просування результатів досліджень і розробок на ринок інноваційної продукції; оцінка ефективності інновацій. Тоді в ієархії людських цінностей на перше місце піднімається почуття колективності, цінність власної репутації, самоповага, потреба в реалізації своїх потенцій. Так, генезис, піраміда знань, та вагомий внесок ведучих викладачів вузів дає поштовх розвитку винахідництва.

## ВИСНОВКИ

1. Зберігається прогностичне значення коефіцієнта інтелекту (IQ), необхідного для визначення місця кожної людини.

2. Дарвінівська теорія природного відбору, менделевської теорія спадковості, хромосомна теорія Моргана, подвійна спіраль ДНК Уотсона-Кріка, таблиця Менделєєва звели до простих закономірностей "монблани" фактів та ставить завдання перед вченими: велику різноманітність фактів в будь-якій області наших знань – упакувати явища в загально зрозумілі закони, алгоритми або формули.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Альтшуллер Г.С. Алгоритм изобретения. – М.: Моск. рабочий, 1973. – 296 с.
- Альтшуллер Г.С. Творчество, как точная наука. – М.: Радио и связь, 1979. – 175 с.

- Барановський Д.І. Болонський процес реформування вищої освіти в Україні / Д.І. Барановський, О.М. Маменко, В.І. Грицаенко, К.В. Грицаенко // Методичне удосконалення навчального процесу / ХДЗВА. – Х., 2011. – Т.3. – С. 36-46.
- Грицаенко В.І. Винахідництво на інженерній кафедрі // Методичне удосконалення навчального процесу ХДЗВА. – Х., 2001. – Т. 3. – С. 232-234.
- Грицаенко В.І. Советы рационализаторам и изобретателям сельскохозяйственного производства / В.І. Грицаенко, А.А. Задорожний, П.П. Черпак // К.: Урожай, 1988. – 200 с.
- Грицаенко В.І. Інноваційне забезпечення винахідницької діяльності в системі навчального процесу / В.І. Грицаенко, Л.В. Гусінська // Методичне удосконалення навчального процесу / ХДЗВА. – Х., 2007. – Вип. 1, т. 1. – С. 208-211.
- Ділтс Р. Стратегии гениев. Т.3. – М.: Класс, 1998. – 384 с.
- Ларцев В.С. Социокультурный генезис личности. К.: Принт-Экспресс, 2002. – 360 с.
- Теоретичні і приладні аспекти розвитку креативної освіти у вищий школі : монографія / за ред. О.А. Дубасенюк. – Житомир: ЖДУ, 2012. – 284 с.
- Тесла Н. Лекции. – Самара: Агни, 2008. – 312 с.
- Тесла Н. Патенты. – Самара: Агни, 2009. – 496 с.
- Эфроимсон В.П. Генетика гениальности. – М.: Тайдекс, 2002. – 376 с.
- Эфроимсон В.П. Педагогическая генетика. – М.: Тайдекс, 2003. – 238 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Al'tshuller G.S. Algoritm izobreteniya. - M.: Mosk. rabochij, 1973. - 296 s. 2. Al'tshuller G.S. Tvorchestvo, kak tochnaya nauka. - M.: Radio i svyaz', 1979. - 175 s. 3. Baranov's'kij D.I. Bolons'kij proces reformuvannya vischoi osviti v Ukrayni / D.I. Baranov's'kij, O.M. Mamenko, V.I. Gricaenko, K.V. Gricaenko // Metodichne udoskonalennya navchal'nogo procesu / HDZVA. - H., 2011. - T.3. - S. 36-46. 4. Gricaenko V.I. Vinahidnictvo na inzhenernij kafedri // Metodichne udoskonalennya navchal'nogo procesu HDZVA. - H., 2001. - T. 3. - S. 232-234. 5. Gricaenko V.I. Sovety racionalizatoram i izobretatelyam sel'skohozyajstvennogo proizvodstva / V.I. Gricaenko, A.A. Zadorozhniy, P.P. Cherpak // K.: Urozhaj, 1988. - 200 s. 6. Gricaenko V.I. Innovacijne zabezpechennya vinahidnic'koj diyal'nosti v sistemi navchal'nogo procesu / V.I. Gricaenko, L.V. Gusinya // Metodichne udoskonalennya navchal'nogo procesu / HDZVA. - H., 2007. - Vip. 1, t. 1. - S. 208-211. 7. Dilts R. Strategii geniev. T.3. - M.: Klass, 1998. - 384 s. 8. Larcev V.S. Sociokul'turnyj genezis lichnosti. K.: Print-'Ekspress, 2002. - 360 s. 9. Teoretichni i priladni aspekti roзвитку kreativnoї osвіти u vischij shkoli : monografija / za red. O.A. Dubasenuk. - Zhitomir: ZhDU, 2012. - 284 s. 10. Tesla N. Lekcii. - Samara: Agni, 2008. - 312 s. 11. Tesla N. Patenty. - Samara: Agni, 2009. - 496 s. 12. Efroimson V.P. Genetika genial'nosti. - M.: Tajdex, 2002. - 376 s. 13. Efroimson V.P. Pedagogicheskaya genetika. - M.: Tajdex, 2003. - 238 s.

Надійшла 12.10.2012

*Грицаенко Володимир Іванович, к.т.н., доц.*  
Харківська державна зооветеринарна академія,  
кафедра технології проектування, механізації  
і технічного сервісу  
62341, Харківська обл., Дергачівський район,  
смт. Мала Данилівка, ХДЗВА  
тел.: (05763) 57480

*Gritsayenko V.I.  
Genesis of invention.*

Genesis of invention from the Middle Ages up to the present is described in the article. There is a great problem for scientists concerning necessity of "packing" great variety of facts and phenomena in the field of knowledge into natural laws, algorithms or formulas.

*Key words – genesis, invention, IQ, reflex, aim.*

## **РАСХОЖДЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ФАКТОРОВ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ИСПЫТАНИИ НА НАГРЕВ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ**

*Наведено результати аналізу теплових процесів, які протікають в обмотках тягових електрических машин при їх випробуваннях на нагрів методом взаємного навантаження. Отримано аналітичні вирази, які дозволяють визначити ступінь розходження теплових навантажень обмоток якорей електромашин, що випробуються, за значенням їх к.к.д., питомих втрат потужності та відносного відхилення їх магнітних характеристик.*

*Приведены результаты анализа тепловых процессов, протекающих в обмотках тяговых электрических машин при их испытаниях на нагрев методом взаимной нагрузки. Получены аналитические выражения, позволяющие определить степень расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых электромашин по значениям их к.п.д., удельных потерь мощности и относительного отклонения их магнитных характеристик.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Требования соответствующих стандартов [1] и правил ремонта тягового подвижного состава [2, 3] предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой тяговой электромашины: либо вновь изготовленной, либо вышедшей из ремонта. Эти испытания представляют собой важную, неотъемлемую часть технологического процесса изготовления или ремонта тяговой электромашины, материальные затраты на которую входят в себестоимость конечной продукции.

Качество технического контроля, проводимого при приёмо-сдаточных испытаниях тяговых электромашин, в конечном счёте, определяет надёжность и безотказность всего тягового средства, а, следовательно, и эффективность самих железнодорожных перевозок.

Одним из важных условий обеспечения качества испытаний на нагрев является равенство тепловых нагрузок лимитирующих обмоток обеих испытуемых электромашин, которая определяет корректность оценки результатов испытаний. Требование ГОСТ 2582-81 [1] в части токовой нагруженности обмоток испытуемых двигателя и генератора является формальным, так как не учитывает ни схемы испытания, ни то, какая из обмоток электромашины является лимитирующей [4]. Тем не менее, этот фактор, определяющий качество испытаний, должен учитываться при оптимизации структуры системы взаимного нагружения.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых электромашин будет наблюдаться при использовании схем взаимной нагрузки либо с параллельным источником электрической мощности, либо с конвертором напряжения (тока) [5]. Положительная разница токов якорей испытуемых двигателей и генератора в данных схемах обусловлена необходимостью создания избыточного (небалансного) электромагнитного момента, обеспечивающего компенсацию потерь холостого хода или суммарных потерь мощности в системе взаимного нагружения [6]. Представим такую положительную разницу токов якорей в виде

$$\Delta I_{\text{я}} = I_{\text{яд}} - I_{\text{яг}},$$

где  $I_{\text{яд}}$  и  $I_{\text{яг}}$  – токи якорей испытуемого двигателя и

генератора соответственно.

Относительная разница токов якорей испытуемых электромашин, приведенная к току якоря испытуемого двигателя, может быть определена в виде отношения

$$K_{\Delta I} = \frac{\Delta I_{\text{я}}}{I_{\text{яд}}} \quad (1)$$

или

$$K_{\Delta I} = 1 - K_{I_{\text{я}}},$$

где  $K_{I_{\text{я}}}$  – отношение токов якорей испытуемого генератора и двигателя

$$K_{I_{\text{я}}} = \frac{I_{\text{яг}}}{I_{\text{яд}}}$$

Как показывают расчёты и опыт проведения испытаний, ток испытуемого генератора может изменяться в диапазоне

$$I_{\text{яг}} \in [0,8I_{\text{q}}; I_{\text{q}}],$$

где  $I_{\text{q}}$  – часовое значение тока, которое при испытаниях устанавливается на электромашине, работающей в режиме двигателя.

Качество тепловых испытаний тяговых электромашин, испытуемых с расхождением токов  $\Delta I_{\text{я}}$ , может быть оценено разностью превышений температур обмоток якорей  $\Delta \tau_{\text{я}}$  или их отношением  $K_{\tau_{\text{я}}}$  в момент времени  $t_1$  окончания испытания при условии равенства тепловых параметров и условий охлаждения. Представим данные параметры в виде:

$$\begin{aligned} \Delta \tau_{\text{я}}(t_1) &= \tau_{\text{яд}}(t_1) - \tau_{\text{яг}}(t_1); \\ K_{\tau_{\text{я}}}(t_1) &= \frac{\tau_{\text{яг}}(t_1)}{\tau_{\text{яд}}(t_1)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{яд}}$  и  $\tau_{\text{яг}}$  – превышения температур обмоток якорей двигателя и генератора соответственно.

Относительная разность превышений температур якорей двигателя и генератора может быть представлена в виде

$$K_{\Delta \tau}(t_1) = \frac{\Delta \tau_{\text{я}}(t_1)}{\tau_{\text{яд}}(t_1)}.$$

Нетрудно убедиться в справедливости выражения

$$K_{\Delta \tau}(t_1) = 1 - K_{\tau_{\text{я}}}(t_1).$$

Целью данного исследования является определение аналитических выражений, позволяющих определить степень расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых электромашин по значениям к.п.д., удельных потерь мощности и относительного отклонения их магнитных характеристик.

Расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин определяет характер распределения мощности между двумя источниками энергии системы взаимного нагружения, а в случае, если один из них является параллельным источником напряжения, и степень расхождения токовых нагрузок обмоток якорей [7].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ОБМОТОК ЯКОРЕЙ

Изменение температуры обмотки якоря во времени при испытании может быть описано уравнением вида [8]

$$\tau_{\text{я}} = \tau_{\text{я}\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}}\right),$$

где  $\tau_{\text{я}\infty}$  – установившееся превышение температуры;  $T_3$  – эквивалентная постоянная времени нагревания.

Установившееся превышение и эквивалентная постоянная времени могут быть определены аналитически в виде [8]:

$$\tau_{\text{я}\infty} = \frac{\Delta P_3}{B_{\text{пр}} - I_{\text{я}}^2 R_o \alpha}; T_3 = \frac{C_{\text{пр}}}{B_{\text{пр}} - I_{\text{я}}^2 R_o \alpha},$$

где  $\Delta P_3$  – эквивалентные потери;  $B_{\text{пр}}$  – приведенная теплоотдача;  $C_{\text{пр}}$  – приведенная теплоёмкость;  $R_o$  – сопротивление обмотки при нулевом превышении температуры;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Эквивалентные потери  $\Delta P_3$  с допустимой степенью упрощения могут быть приняты пропорциональными квадрату тока якоря

$$\Delta P_3 \sim I_{\text{я}}^2.$$

Зависимости  $\tau_{\text{я}\infty}(I_{\text{я}})$  и  $T_3(I_{\text{я}})$  являются тепловыми характеристиками тяговой электромашины, относятся к типовым и, в принципе, известны для каждого типа тягового двигателя [4]. Эти характеристики также могут быть построены по кривым нагревания обмоток тяговой электромашины, которые снимаются при квалификационных испытаниях и являются частью протоколов этих испытаний [1].

Исходя из своей природы, зависимость  $\tau_{\text{я}\infty}(I_{\text{я}})$  должна достаточно хорошо описываться аналитической функцией вида

$$\tau_{\text{я}\infty} = \frac{I_{\text{я}}^2}{a - b \cdot I_{\text{я}}^2},$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты.

Однако, как показывает анализ тепловых характеристик реальных тяговых двигателей [4], данная функция достаточно точно описывает зависимость  $\tau_{\infty}(I)$  только на отдельных отрезках изменения тока. Для многих тяговых двигателей электроподвижного состава более точно данная характеристика описывается в окрестностях точки часового режима более простой функцией вида

$$\tau_{\text{я}\infty} = a \cdot I_{\text{я}}^2.$$

Зависимость  $T_3(I)$  является менее выраженной, чем  $\tau_{\infty}(I)$ . В тяговых расчетах при определении превышения температуры обмоток якорей значение постоянной времени  $T_3$  для тяговых двигателей электровозов вообще принимается постоянной, не зависящей от тока [4]

$$T_3 = \text{const.}$$

Если принять допущение, что на ожидаемом интервале изменения тока  $I_{\text{я}} \in [0,8I_{\text{q}}; I_{\text{q}}]$  установившееся превышение температуры  $\tau_{\text{я}\infty}$  пропорционально квадрату тока якоря  $I_{\text{я}}$ , а постоянная времени нагревания  $T_3$  неизменна, то отношение температур обмоток якорей по формуле (2) в любой момент времени с допустимой степенью упрощения можно принять постоянным и равным

$$K_{\text{тя}} = \frac{\tau_{\text{я}\infty}}{\tau_{\text{яд}\infty}} = \frac{I_{\text{я}}^2}{I_{\text{яд}}^2} = K_{\text{я}}^2, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{я}\infty}$  и  $\tau_{\text{яд}\infty}$  – установившиеся превышения температур якорей испытуемых генератора и двигателя соответственно.

Таким образом, отношение превышений температур обмоток якорей испытуемых электромашин будет равно отношению их тепловых факторов.

Для схем взаимного нагружения с одним параллельным источником электрической мощности выражение для разницы токов якорей испытуемых электромашин будет иметь вид [7]

$$\Delta I_{\text{я}} = \frac{\sum \Delta P}{E_{\text{д}}}, \quad (4)$$

где  $\sum \Delta P$  – суммарные потери мощности испытуемых электромашин;  $E_{\text{д}}$  – э. д. с. испытуемого двигателя.

Для систем взаимного нагружения с двумя источниками мощности, одним из которых является источник электрической мощности, включенный параллельно, разница токов якорей испытуемых электромашин будет иметь вид [9]

$$\Delta I_{\text{я}} = \frac{\sum \Delta P_{\text{хх}} - \Delta E I_{\text{я}}}{E_{\text{д}}}, \quad (5)$$

где  $\sum \Delta P_{\text{хх}}$  – суммарные потери холостого хода испытуемых электромашин;  $\Delta E$  – разница э. д. с. испытуемого двигателя  $E_{\text{д}}$  и генератора  $E_{\text{г}}$ , обусловленная расхождением их магнитных характеристик.

$$\Delta E = E_{\text{д}} - E_{\text{г}}.$$

Приведенная разница токов якорей генератора и двигателя для схем с одним источником, полученная по формуле (1) с учётом выражения (4), будет определяться в виде

$$I'_{\Delta I} = \sum \Delta p, \quad (6)$$

где  $\sum \Delta p$  – полные суммарные приведенные потери мощности испытуемых электромашин

$$\sum \Delta p = \frac{\sum \Delta P}{P_{\text{эмд}}},$$

где  $P_{\text{эмд}}$  – электромагнитная мощность испытуемого двигателя.

Приведенная разница токов якорей генератора и двигателя для схем с двумя источниками, полученная по формуле (1) с учётом выражения (5), будет опреде-

ляться выражением

$$K''_{\Delta I} = \sum \Delta p_{xx} - K_{Ia} \cdot \Delta E^*, \quad (7)$$

где  $\sum \Delta p_{xx}$  – суммарные приведенные потери холостого хода испытуемых электромашин;  $\Delta E^*$  – приведенная разность э.д.с. электромашин, обусловленная расхождением их магнитных характеристик

$$\sum \Delta p_{xx} = \frac{\sum \Delta P_{xx}}{P_{\text{эмд}}}; \quad \Delta E^* = \frac{\Delta E}{E_d}.$$

Минимальное значение отрицательной приведенной разности э.д.с. испытуемых электромашин может быть принято равным

$$\Delta E^* = -2\Delta \bar{n}^*, \quad (8)$$

где  $\Delta \bar{n}^*$  – максимально допустимое положительное отклонение частоты вращения электромашины от типового значения часовой частоты вращения.

С допустимой степенью упрощения можно принять относительные разницы токов электромашин для двух вариантов схемы взаимного нагружения:

$$K'_{\Delta I} = \sum \Delta p; \quad K''_{\Delta I} = \sum \Delta p_{xx} + 2\Delta \bar{n}^*,$$

где  $\sum \Delta p$  и  $\sum \Delta p_{xx}$  – полные потери и потери холостого хода соответственно, приведенные к часовой мощности

$$\sum \Delta p = \frac{\sum \Delta p}{P_q}; \quad \sum \Delta p_{xx} = \frac{\sum \Delta P}{P_q},$$

где  $P_q$  – мощность часового режима испытуемых электромашин.

Отношения токов якорей, выраженные через приведенные потери, с учётом формул (6)-(8) будут иметь вид:

$$K'_{Ia} = 1 - \sum \Delta p; \quad K''_{Ia} = 1 - \sum \Delta p_{xx} - 2\Delta \bar{n}^*.$$

Тогда отношения тепловых факторов для двух вариантов схемы взаимного нагружения с учётом выражения (3):

$$K'_{\text{тя}} = (1 - \sum \Delta p)^2; \quad (9)$$

$$K''_{\text{тя}} = (1 - \sum \Delta p_{xx} - 2\Delta \bar{n}^*)^2. \quad (10)$$

Для тяговых двигателей электровозов и электропоездов  $\Delta \bar{n}^* = 0,03$  [1]. Тогда выражение для отношения тепловых факторов обмоток якорей при варианте с двумя источниками мощности будем иметь в виде

$$K''_{\text{тя}} = (1 - \sum \Delta p_{xx} - 0,06)^2.$$

В расчетах можно принять:

$$\sum \Delta p = 2\Delta p; \quad \sum \Delta p_{xx} = 2\Delta p_{xx},$$

где  $\Delta p$  – полные приведенные потери одной испытуемой электромашины;  $\Delta p_{xx}$  – приведенные потери холостого хода одной испытуемой электромашины.

Необходимо отметить, что отношение тепловых факторов обмоток якорей электромашин, испытуемых по схеме взаимного нагружения с одним последовательным источником электрической мощности и конвертором напряжения [6] будет определяться по формуле, аналогичной выражению (10).

Приведенные потери одной электромашины могут быть определены в виде:

$$\Delta p = 1 - \eta_q; \quad (11)$$

$$\Delta p_{xx} = 1 - \eta_q - \Delta p_3, \quad (12)$$

где  $\eta_q$  – к.п.д. испытуемых электромашин в часовом режиме;  $\Delta p_3$  – приведенные электрические потери одной испытуемой электромашины

$$\Delta p_3 = \frac{I^2 \sum R}{P_q}, \quad (13)$$

где  $\sum R$  – суммарное сопротивление обмоток одной испытуемой электромашины.

Здесь необходимо отметить, что при определении удельных потерь  $\Delta p_{xx}$  по формуле (12) необходимо использовать параметры  $\eta_q$  и  $\sum R$ , соответствующие нагретому состоянию тяговой электромашины. В принципе значение удельных потерь холостого хода  $\Delta p_{xx}$  может быть определено из протоколов приёмосдаточных испытаний тяговых электрических машин соответствующих типов.

В табл. 1 приведены результаты расчётов отношений тепловых факторов  $K'_{\text{тя}}$  и  $K''_{\text{тя}}$ , проведенных для некоторых типов тяговых двигателей электровозов и электропоездов [4] с использованием полученных в анализе выражений (9)-(13).

Таблица 1

Тип ТЭД	НБ-406	НБ-418К	УРТ-110А	РТ-51Д
$K'_{\text{тя}}$	0,71	0,789	0,673	0,672
$K''_{\text{тя}}$	0,754	0,823	0,776	0,854

## ВЫВОДЫ

Из табл. 1 видно, что для тяговых двигателей с большой долей потерь холостого хода возможное расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей при испытании на нагрев методом взаимной нагрузки весьма существенно даже при использовании схемы с двумя источниками, один из которых является параллельным источником электрической мощности.

При использовании схемы с одним параллельным источником электрической мощности возможное расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых электромашин недопустимо с точки зрения обеспечения качества испытаний на нагрев.

При максимально допустимом расхождении магнитных характеристик электромашин [1] тепловой фактор обмотки якоря генератора при испытании по схеме с вольтодобавочной машиной и линейным генератором [7] может быть на 25% меньше теплового фактора обмотки якоря двигателя (НБ-406). При таких условиях с вероятностью, равной 0,5, могут быть признаны успешными испытания на нагрев тяговой электромашины (испытываемой на стенде в режиме генератора) с недопустимо завышенным значением превышения температуры в часовом режиме на 25%.

Решение проблемы расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей и повышения качества испытаний на нагрев тяговых электрических машин может быть достигнуто за счёт отказа от использования в системах взаимного нагружения параллельного источника электрической мощности и конвертора напряжения (тока) [6, 10].

Полное совпадение тепловых нагрузок всех обмоток испытуемых электромашин может наблюдаться

только в случае использования системы взаимной нагрузки с электрическим способом компенсации электрических потерь и механическим способом компенсации потерь холостого хода [7].

При использовании классической схемы взаимной нагрузки с вольтодобавочной машиной и линейным генератором значение превышения температуры якоря электромашины, испытуемой в режиме генератора, должно корректироваться по реальному значению тока генератора, измеренному при проведении испытаний на нагрев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические врачающиеся тяговые. [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 50 с.
2. Правила ремонту електрических машин електровозів і електропоїздів. № ЦТ-0063. Затверджено і введено в дію наказом Міністерства транспорту України № 53-Ц від 27.02.2003 р. – К.: Видавничий дім "САМ", 2003. – 286 с.
3. Правила ремонту електрических машин тепловозів. № ЦТ-0064. Затверджено і введено в дію наказом Міністерства транспорту України № 53-Ц від 27.02.2003 р. – К.: Видавничий дім "САМ", 2003. – 122 с.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287с.
5. Афанасов А.М. Электромеханические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока [Текст] / А.М. Афанасов // Вісник Дн. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна: Зб. наук. пр. – 2009. – Вип. 27. – С. 42-46.
6. Афанасов А.М. Принципы синтеза схем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного тока // Наук.-техн. збір. "Гірница електромеханіка та автоматика". – 2010. – Вип. 85. – С. 183-189.
7. Захарченко Д.Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы [Текст] / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов, Е.В. Горчаков. – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.
8. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги [Текст] / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
9. Афанасов А.М. К вопросу о выборе мощности источников питания стенда взаимной нагрузки тяговых электромашин // Вісник НТУ "ХПІ". – 2009. – № 27. – С. 3-9.
10. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г.К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. GOST 2582-81. Mashiny `elektricheskie vraschayushchesya tyagovye. [Tekst] / Gosudarstvennyj standart SSSR. - M.: Izdatel'stvo standartov, 1981. - 50 s. 2. Pravila remonta elektricheskikh mashin elektrovoziv i elektropoizdiv. № CT-0063. Zatverdzheno i vvedeno v diyu nakazom Ministerstva transportu Ukrayni № 53-C vid 27.02.2003 r. - K.: Vidavnichij dim "SAM", 2003. - 286 s. 3. Pravila remonta elektricheskikh mashin teplovoziv. № CT-0064. Zatverdzheno i vvedeno v diyu nakazom Ministerstva transportu Ukrayni № 53-C vid 27.02.2003 r. - K.: Vidavnichij dim "SAM", 2003. - 122 s. 4. Pravila tyagovyh raschetov dlya poezdnoj raboty. - M.: Transport, 1985. - 287s. 5. Afanasov A.M. `Elektromehanicheskie principy obespecheniya vzaimnoj nagruzki `elektricheskikh mashin postoyannogo toka [Tekst] / A.M. Afanasov // Visnik Dn. nac. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana: Zb. nauk. pr. - 2009. - Vip. 27. - S. 42-46. 6. Afanasov A.M. Principy sinteza shem vzaimnoj nagruzki tyagovyh `elektromashin postoyannogo toka // Nauk.-tehn. zbir. "Girnicha elektromehanika ta avtomatika". - 2010. - Vip. 85. - S. 183-189. 7. Zaharchenko D.D. Tyagovye `elektricheskie mashiny i transformatory [Tekst] / D.D. Zaharchenko, N.A. Rotanov, E.V. Gorchakov. - M.: Transport, 1979. - 303 s. 8. Rozenfel'd V.E. Teoriya `elektricheskoy tyagi [Tekst] / V.E. Rozenfel'd, I.P. Isaev, N.N. Sidorov. - M.: Transport, 1983. - 328 s. 9. Afanasov A.M. K voprosu o vybere moschnosti istochnikov pitanija stenda vzaimnoj nagruzki tyagovyh `elektromashin // Visnik NTU "HPI". - 2009. - № 27. - S. 3-9. 10. Zherve G.K. Promyshlennye ispytaniya `elektricheskikh mashin [Tekst] / G.K. Zherve. - L.: Energoatomizdat, 1984. - 408 s.

Поступила 17.10.2012

Афанасов Андрей Михайлович, к.т.н., доц.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, Украина, 49010, Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2, тел. (056) 373-15-31, e-mail: afanasof@gmail.com

Afanasov A.M.

#### Divergence of thermal factors of traction machine armature windings under heat test via back-to-back method.

Results of analysis of thermal processes in traction electric machines windings under their heat tests with a back-to-back method are presented. Analytical expressions are derived to allow specifying the degree of divergence of the tested machines armature windings thermal loads by values of their efficiency, specific power loss and relative deviation of their magnetic characteristics.

**Key words – electric locomotive, electric train, traction electric machine, heat test, armature winding, thermal factor.**

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФЕРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Розроблена математична модель загальмованого індукційно-динамічного двигуна з феромагнітним осердям. Запропонованій критерій ефективності, який враховує комплекс силових та масогабаритних показників двигуна. Проведено математичне моделювання процесів в двигуні при різних параметрах феромагнітного осердя. Показано, що при певних параметрах осердя підвищує ефективність двигуна на 30-40%. Встановлені геометричні параметри осердя, при яких ефективність максимальна. Проведені експериментальні дослідження двигуна.*

*Разработана математическая модель заторможенного индукционно-динамического двигателя с ферромагнитным сердечником. Предложен критерий эффективности, учитывающий комплекс силовых и массогабаритных показателей двигателя. Проведено математическое моделирование процессов в двигателе при различных параметрах ферромагнитного сердечника. Показано, что при определенных параметрах сердечник повышает эффективность двигателя на 30-40%. Установлены геометрические параметры сердечника, при которых эффективность максимальна. Проведены экспериментальные исследования двигателя.*

### ВСТУПЛЕНИЕ

Индукционно-динамические двигатели (ИДД), предназначенные для создания значительных динамических усилий при незначительном перемещении якоря с ударным элементом, применяются в научных исследованиях, промышленности и сферах безопасности, где используются электромеханические системы ударно-импульсного действия [1-4].

Традиционные ИДД выполняются, как правило, без ферромагнитного сердечника (ФС), что обусловлено, в основном, быстродействием рабочих процессов, значительным уровнем возбуждаемых электромагнитных полей и ограничениями по массогабаритным показателям [5-7].

Однако ФС при определенных параметрах может существенно перераспределять магнитные поля в ИДД, снижая поля рассеяния в окружающее пространство и увеличивая поля в активной зоне [8]. Тем самым, могут улучшаться электромагнитная совместимость с близко расположенными электронными устройствами и экологическая чистота для окружающего персонала и повышаться силовые показатели ИДД.

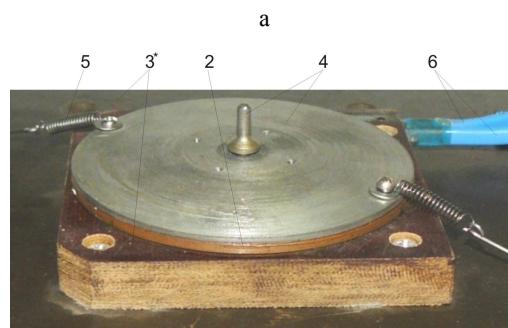
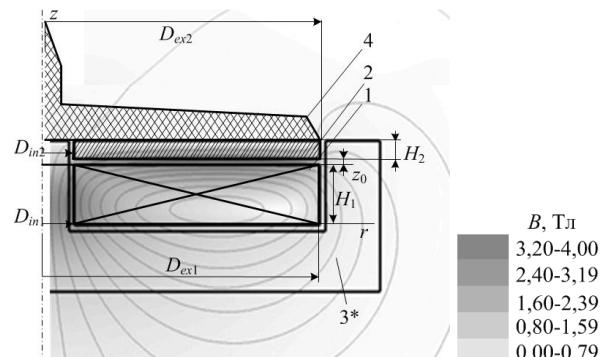
Одним из факторов, сдерживающих применение ФС в ИДД, является отсутствие эффективных математических моделей и соответствующего программного обеспечения. Из-за этого затруднительно обеспечить выбор эффективных конструктивных элементов ФС, в максимальной степени удовлетворяющих ряду противоречивых факторов. Известные математические модели ИДД используют постоянство магнитной проницаемости, линейность кривой намагничивания и отсутствие насыщения стали ФС, равномерность индуцированного тока по сечению якоря, пренебрежение нагрева электропроводящих элементов ИДД током. [9-14]. Эти и другие упрощения существенно исказывают реальную действительность быстропротекающих рабочих процессов в ИДД.

Поскольку максимальные электродинамические силы в ИДД возникают при отсутствии зазора между якорем и индуктором, что имеет место в начальный момент, интерес представляет режим работы двигателя с заторможенным якорем (при отсутствии перемещения якоря), что позволит оценить возможности ФС.

Целью статьи является оценка эффективности ИДД с заторможенным якорем при учете его силовых и массо-габаритных показателей от конструкции, конфигурации и геометрических параметров ФС.

### КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА БАЗОВОГО ВАРИАНТА ИДД

В качестве базового варианта используем ИДД коаксиальной конфигурации без ФС [15]. На рис. 1,а показано схематическое устройство ИДД с указанием геометрических параметров и распределением магнитного поля в момент максимума электродинамических усилий, а на рис. 1,б – общий вид исследуемого образца.



б  
Рис. 1

Магнитное поле представлено в виде силовых линий и распределения индукции  $B$  в виде оттенков серого цвета. Шкала индукции, представленная на рис. 1,а будет общей для всех последующих рисунков.

ИДД состоит из многовиткового дискового индуктора 1, который возбуждается от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) сформированным апериодическим импульсом (индуктор шунтируется обратным диодом), и массивного (одновиткового) электропроводящего якоря 2. Индуктор выполнен монолитным (пропитан эпоксидной смолой внутри стеклотекстолитового каркаса 3\*), а к якорю присоединен силовой элемент 4 (опорный диск с бойком). Возвратные пружины 5 обеспечивают неподвижность якоря с силовым элементом, а шины 6 – связь индуктора с ЕНЭ. Токопроводящие элементы индуктора и якоря выполнены из меди. Основные размеры и параметры базового варианта ИДД приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатель	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора	$D_{ex1}$	100 мм
Внутренний диаметр индуктора	$D_{in1}$	10 мм
Высота индуктора	$H_1$	10 мм
Внешний диаметр якоря	$D_{ex2}$	100 мм
Внутренний диаметр якоря	$D_{in2}$	10 мм
Высота якоря	$H_2$	3 мм
Расстояние между индуктором и якорем	$\delta$	1 мм
Количество витков индуктора	$N_1$	46 шт
Сечение шины индуктора	$a \times b$	$1,8 \times 4,8 \text{ мм}^2$
Емкость ЕНЭ	$C$	2850 мкФ
Зарядное напряжение ЕНЭ	$U_0$	400 В

На рис. 2 показано изменение плотности тока в индукторе  $j_1$ , усредненная по сечению плотность тока в якоре  $j_2$ , величина  $f_z$  и импульс  $F_z$  электродинамической силы, которая действует на якорь базового ИДД.

Указанные параметры рассчитаны по методике изложенной в [16]. Как видно, через 1,3 мс после начала работы индуцированный ток якоря меняет полярность, вследствие чего изменяется характер силового воздействия: отталкивание сменяется притяжением. Вследствие этого снижается импульс силы  $F_z$ .

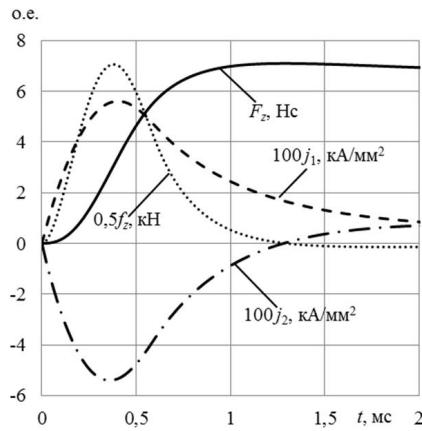


Рис. 2

На рис. 3 представлены распределения аксиальных электродинамических сил по сечению якоря в различные моменты времени. Наибольшие силы действуют через 0,4 мс после начала рабочего процесса

на внутренние участки якоря, обращенные к индуктору, и уменьшаются в аксиальном направлении. Эти силы носят отталкивающий характер. Однако со временем эти силы существенно уменьшаются, что приводит к появлению области минимальных сил внутри якоря. А через 1,6 мс после начала рабочего процесса силы принимают притягивающий характер. При этом силы притяжения меньше сил отталкивания.

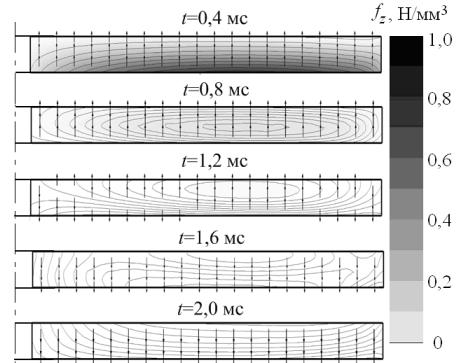


Рис. 3

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИДД С ФС

Для исследования ИДД с ФС было проведено компьютерное моделирование в программном пакете *COMSOL Multiphysics* 4.3, основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов. Программное обеспечение позволяет осуществлять адаптивное построение сетки и контроль ошибок при работе с различными численными решателями. На рис. 4 показан фрагмент программы с исходными данными.

Векторный магнитный потенциал  $A$  рассчитывается с использованием условия Дирихле на внешних границах расчетной области:

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

где  $\mu(B)$  – магнитная проницаемость, зависящая от индукции магнитного поля для ферромагнитного материала,  $\gamma$  – электропроводность материала.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

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

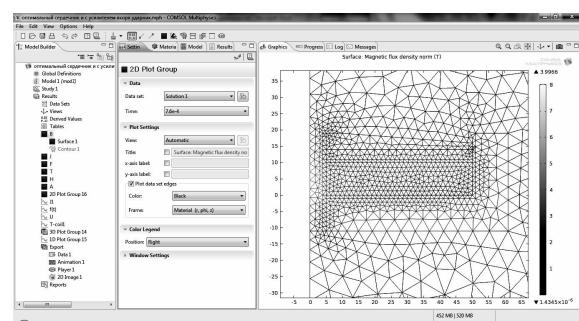


Рис. 4

Границными условиями системы являются  $n \times A = 0$ , где  $n$  – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Плотность тока в конечных элементах якоря определяется по известному выражению

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

Сила, действующая на якорь, рассчитывается следующим образом:

$$f_z = 0,5 \oint (H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)) dS,$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля в объеме, охватывающего якорь.

Для ферромагнитных материалов сердечника используется нелинейная кривая намагничивания  $B=f(H)$ . Импульс электродинамической силы, действующий на якорь, определяется выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt.$$

При расчете рабочих электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов в ИДД предполагаем отсутствие механических перемещений и деформаций элементов ИДД и учитываем пространственное распределение индуцированного тока в якоре на каждом временном шаге.

#### ВЛИЯНИЕ ФС НА ПОКАЗАТЕЛИ ИДД

Рассмотрим ФС, выполненный из стали Ст.10. Коаксиальный ФС 3 комбинированной формы можно представить состоящим из дискового основания 3а, охватывающего индуктор 1 снизу, наружной обечайки 3б и внутреннего цилиндра 3с (рис. 5). На рис. 5,а показано схематическое устройство ИДД без силового элемента 4 (см. рис. 1) с указанием геометрических параметров ФС и распределением магнитного поля в момент максимума электродинамической силы, а на рис.5б – общий вид ИДД с ФС. Указанный стальной сердечник, представляемый совокупностью  $i$ -ых цилиндрических участков, где  $i=\{a, b, c\}$ , можно описать следующими геометрическими параметрами: внешним диаметром  $D_{ex3i}$ , внутренним диаметром  $D_{in3i}$  и высотой  $H_{3i}$  каждого участка. Расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФС заполнено изоляцией и равно  $\delta=1$ мм.

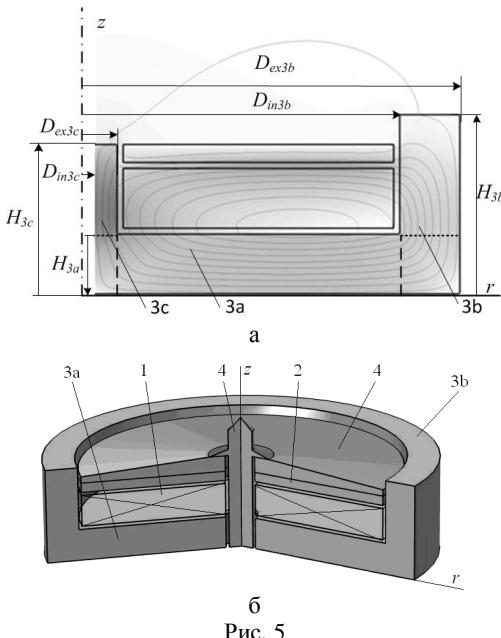


Рис. 5

Геометрические параметры ФС будем описывать следующими безразмерными параметрами:

$$\chi = \frac{H_{3a}}{H_1}; \quad \varepsilon = \frac{H_{3b}}{H_1}; \quad \vartheta = \frac{H_{3c}}{H_1}; \quad \zeta = \frac{D_{in3c}}{D_{in1}}; \quad \theta = \frac{D_{ex3b}}{D_{ex1}}.$$

Если ФС выполнен массивным (нешихтованным), то возникающие в нем вихревые токи экранируют проникновение магнитного поля вглубь сердечника (рис. 6). Кроме того, вихревые токи в ФС при взаимодействии с током индуктора снижают силовые показатели ИДД по сравнению с базовым вариантом: максимальная величина силы  $f_{zm}$  уменьшается на 17 %, импульс силы  $F_z$  – на 21 %. При этом время рабочего процесса  $t^*$ , при котором электродинамические силы изменяют направление действия, возрастает на 20%, а максимальная плотность тока индуктора возрастает незначительно – на 2,1%. При данных расчетах ИДД использовалась электропроводность стали Ст.10.

Таким образом, для того, чтобы сердечник эффективно проводил магнитный поток и не уменьшал силовое воздействие на якорь, его электропроводность для вихревых токов должна быть минимально возможной. Это достигается путем радиальных разрезов или выполнения ФС шихтованным. В дальнейшем будем рассматривать идеализированный сердечник, в котором вихревые токи полностью устранены, т.е. его электропроводность равна нулю.

На рис. 7 представлены варианты ИДД, включающие индуктор 1, якорь 2 и ФС 3 различных конфигураций. В варианте I якорь в направлении оси  $z$  выполнен с возможностью свободного движения без охвата ферромагнетиком; в варианте II – якорь охвачен ФС с зазором в направлении движения; в варианте III – якорь соединен с утолщенной силовой ферромагнитной пластиной; в варианте IV – якорь соединен с утонченной силовой ферромагнитной пластиной; в варианте V – силовая ферромагнитная пластина и центральный боек выполнены с профильными конфигурациями наружных поверхностей; в варианте VI – имеются силовая ферромагнитная пластина и центральный боек, но отсутствует основание ФС.

В табл. 2 приведены параметры указанных ИДД, откуда следует, что наибольшие силовые показатели развивает ИДД, у которого в направлении движения якоря отсутствует ферромагнетик (вариант I), либо он расположен на определенном расстоянии от якоря (вариант II). Именно в этих вариантах наблюдается наибольшее возрастание времени рабочего процесса  $t^*$ . Под вариантом 0 выступает базовый вариант ИДД, силовые показатели которого хуже, чем у ИДД с ФС.

Таблица 2

Вариант ИДД	$D_{ex3c}$ , мм	$H_m$ , мм	$F_{zm}$ , Нс	$f_{zm}$ , кН	$j_{1m}$ , кА/мм <sup>2</sup>	$t^*$ , мс
0	100	14	7,09	14,12	561	1,28
I	120	30	10,56	16,85	573	1,68
II	120	45	10,76	17,10	475	1,94
III	120	30	8,85	16,64	464	1,04
IV	120	30	9,47	16,71	464	1,14
V	120	30	10,03	17,09	469	1,28
VI	100	30	7,11	14,37	561	1,18

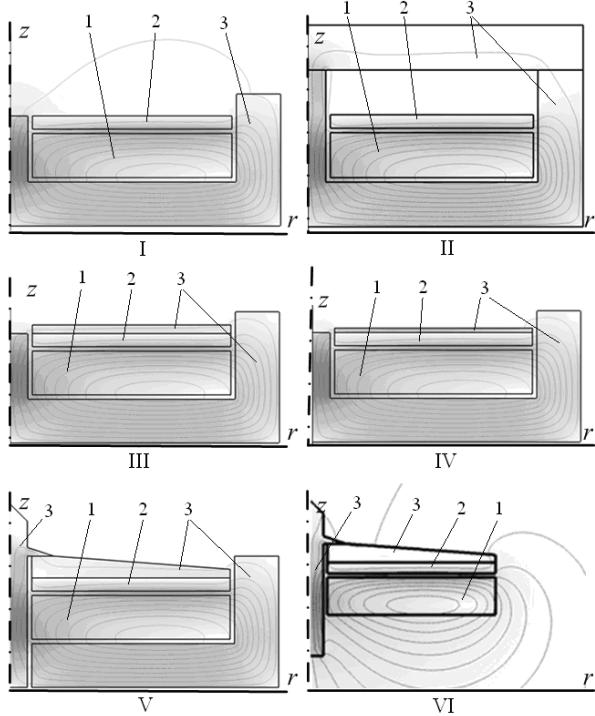


Рис. 7

Наличие ферромагнитных пластин, присоединенных к якорю (варианты III и IV), неоправданно, поскольку действующая на них электромагнитная сила притяжения уменьшает электродинамическую силу, действующую на якорь.

При профильной конфигурации бойка и наружной поверхности силовой пластины удается повысить силовые показатели ИДД (вариант V), что и было реализовано на практике (см. рис. 1). Однако если отсутствует основание ФС (вариант VI), то силовые показатели ИДД существенно ухудшаются.

В вариантах I – V ИДД, у которых присутствует основание ФС, его толщина выбрана такой, что магнитные поля концентрируются внутри сердечника и не выходят на его наружную поверхность. Тем самым обеспечивается уменьшение полей рассеяния.

Введение ФС изменяет амплитудные и временные показатели рабочего процесса ИДД. На рис. 8 представлены характеристики для варианта I, у которого якорь выполнен с возможностью свободного движения.

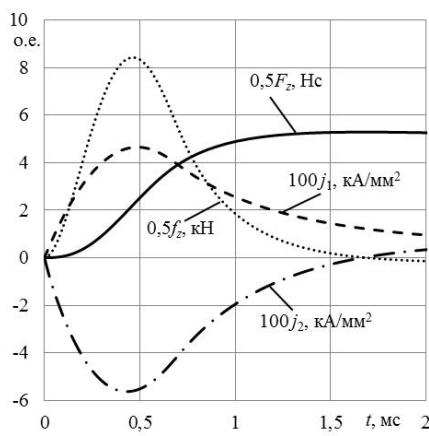


Рис. 8

По сравнению с базовым вариантом наблюдается рост максимальной величины  $f_{zm}$  и импульса  $F_z$  электродинамической силы, происходит затягивание времени переходного процесса ( $t^*$  возрастает на 27 %). Кроме того, ФС уменьшает максимальное значение плотности тока в индукторе, что важно для электронной системы управления ИДД.

На рис. 9 представлены распределения аксиальных электродинамических сил по сечению якоря в различные моменты времени ИДД с ФС. Здесь, как и в варианте с отсутствием ФС (см. рис. 3), наибольшие силы отталкивания действуют через 0,4 мс после начала рабочего процесса на внутренние участки якоря, обращенные к индуктору, и уменьшаются в аксиальном направлении. Однако при этом происходит выравнивание сил в радиальном направлении. Через 0,8 мс после начала рабочего процесса величина рассматриваемых сил остается довольно большой, причем максимальные силы концентрируются внутри якоря ближе к наружному радиусу. А через 2 мс после начала процесса силы меняют направление воздействия.

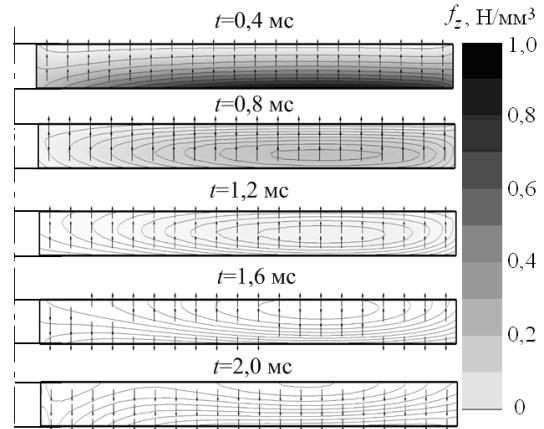


Рис. 9

Таким образом, ФС влияет на силовые показатели ИДД, амплитуду тока индуктора, длительности рабочих процессов. Однако при этом ФС увеличивает массогабаритные показатели двигателя, что требует комплексного рассмотрения проблемы с учетом различных факторов.

#### КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДД

Для анализа влияния ФС на работу ИДД используем критерий эффективности

$$\eta^* = \sum_{n=1}^5 K_n,$$

который учитывает относительные, нормированные к базовому варианту, показатели:

$$K_1 = \beta_1 (1 - F_{zm}^* / F_{zm}); \quad K_2 = \beta_2 (1 - f_{zm}^* / f_{zm});$$

$$K_3 = \beta_3 j_{1m}^* / j_{1m}; \quad K_4 = \beta_4 \frac{m^*}{m + m_3};$$

$$K_5 = \beta_5 \left( 0,4 \frac{D_{ex3b}}{D_{ex1}} + 0,6 \frac{H_{3m}}{H_1} \right),$$

где  $H_{3m} = \max\{H_{3b}, H_{3c}, (H_1 + \delta + H_2)\}$ ; масса ФС,  $i = \{a, b, c\}$ :

$$m_3 = 0,25\pi\gamma \left( \sum_{i=1}^3 (D_{ex3i}^2 - D_{in3i}^2) H_{3i} - \sum_{i=2}^3 (D_{ex3i}^2 - D_{in3i}^2) H_{3a} \right);$$

$F_{zm}$  – максимальное значение импульса электродинамической силы;  $f_{zm}$  – максимальное значение величины электродинамической силы;  $j_{1m}$  – максимальная плотность тока в индукторе;  $m^*$  – масса базового ИДД без каркаса;  $\gamma$  – плотность материала ФС;  $\beta_i$  – весовые коэффициенты показателей эффективности, удовлетворяющие соотношению:

$$\sum_{i=1}^5 \beta_i = 1.$$

Звездочками в показателях помечены соответствующие параметры базового варианта ИДД.

Показатель  $K_1$  оценивает влияние ФС по максимальному импульсу силы,  $K_2$  – по максимальной величине силы,  $K_3$  – по наименьшей величине максимальной плотности тока в индукторе,  $K_4$  – по наименьшей массе, а  $K_5$  – по габаритам.

На основании экспертных оценок для последующих расчетов используем следующие значения весовых коэффициентов:  $\beta_1=0,4$ ;  $\beta_2=0,1$ ;  $\beta_3=0,05$ ;  $\beta_4=0,2$ ;  $\beta_5=0,2$ .

#### ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФС НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИДД

Рассмотрим влияние толщины дисковой части ФС  $3_a$  на эффективность ИДД. Остальные безразмерные геометрические параметры ФС при этом неизменны и равны:  $\zeta=0,8$ ;  $\theta=1,18$ ;  $\vartheta=2,5$ ;  $\varepsilon=3,0$ .

Увеличение толщины дисковой части ферромагнитного сердечника  $H_{3a}$ , представленного на рис. 10 в виде безразмерного геометрического параметра  $\chi$ , существенно влияет на показатели ИДД.

При увеличении параметра  $\chi$  от 0,05 до 1,5 максимальный импульс силы  $F_{zm}$  возрастает на 35,1%, в то время как максимальная величина силы  $f_{zm}$  возрастает в меньшей степени – на 12,3 %. Увеличение импульса силы в большей степени, чем ее максимальной величины, объясняется возрастанием длительности переходного процесса  $t^*$  на 23,5%, при котором сила сохраняет отталкивающий характер. К недостаткам увеличения толщины дисковой части ФС можно отнести увеличение габаритов и массы ИДД. В результате увеличения толщины дисковой части ФС критерий эффективности  $\eta^*$  возрастает на 26,1% и магнитное поле не выходит за пределы ФС. Существенный рост критерия эффективности  $\eta^*$  происходит при увеличении геометрического параметра  $\chi$  от 0,05 до 1,0. Именно последнее значение можно считать оптимальным и оно будет использоваться в последующих расчетах.

Рассмотрим влияние высоты внутреннего цилиндра ФС  $3_c$  на показатели работы ИДД. Увеличение высоты внутреннего цилиндра ФС  $H_{3c}$ , представленного на рис. 11 в виде безразмерного геометрического параметра  $\vartheta$ , несущественно влияет на показатели ИДД.

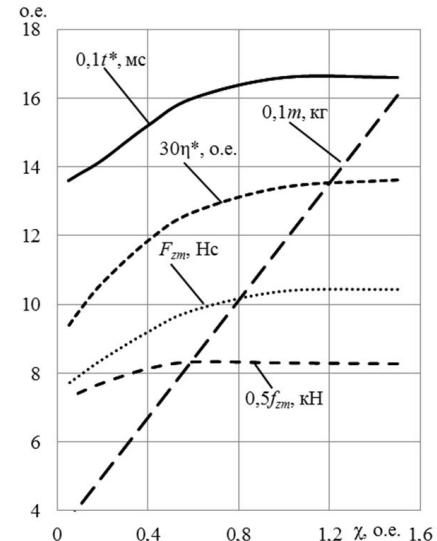
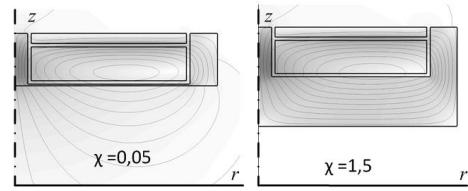


Рис. 10

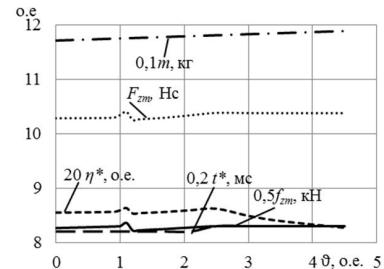
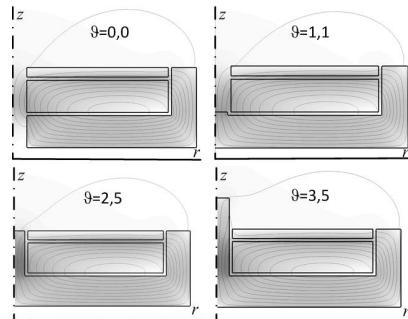


Рис. 11

Незначительные увеличения импульса  $F_{zm}$  и максимальной величины  $f_{zm}$  электродинамической силы и связанное с этим увеличение критерия эффективности проявляется при  $\vartheta=1,1$ , при котором высота  $H_{3c}$  совпадает с нижней поверхностью индуктора. Увеличение высоты внутреннего цилиндра свыше определенного значения ( $\vartheta=2,5$ ) приводит к уменьшению критерия эффективности  $\eta^*$ , что связано в основном с увеличением массогабаритных показателей ИДД. Таким образом, высота внутреннего цилиндра ФС  $H_{3c}$  должна совпадать с наружной поверхностью якоря, т.е. геометрический параметр  $\vartheta$  должен быть равным 2,5.

Рассмотрим влияние высоты наружной обечайки 3b ФС при неизменном ее наружном диаметре. Увеличение высоты наружной обечайки ФС  $H_{3b}$ , представленного на рис. 12 в виде безразмерного геометрического параметра  $\varepsilon$ , заметно влияет на показатели ИДД. Наружная обечайка любой высоты по сравнению с вариантом с ее отсутствием ( $\varepsilon=0$ ) приводит к увеличению эффективности ИДД. Однако увеличение высоты обечайки неравномерно изменяет показатели ИДД. Так, при значении  $\varepsilon=2,15$  наблюдается локальный максимум (высота обечайки совпадает с наружной поверхностью индуктора). При  $\varepsilon=2,5$  возникает локальный минимум (высота обечайки совпадает с наружной поверхностью якоря). Глобальный максимум возникает при  $\varepsilon=3,0$ . В этом случае импульс силы  $F_{zm}$  возрастает на 18,5%, максимальная величина силы  $f_{zm}$  – на 10,5, длительность процесса  $t^*$  – на 9,2% и эффективность  $\eta^*$  – на 22,5%. Последующее увеличение высоты обечайки нецелесообразно.

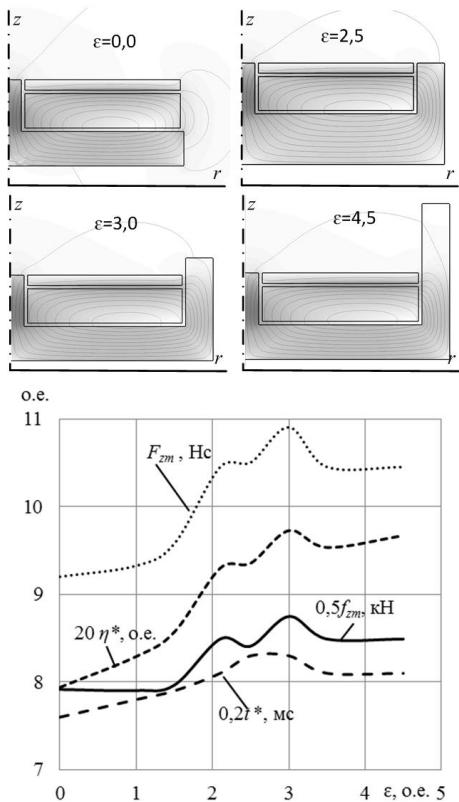


Рис. 12

Рассмотрим влияние диаметра  $D_{ex3b}$  наружной обечайки 3b ФС при неизменной ее высоте. Увеличение диаметра наружной обечайки ФС, представленного на рис. 13 в виде безразмерного геометрического параметра  $\theta$ , повышает показатели ИДД.

Наиболее сильный рост показателей происходит в диапазоне параметра  $\theta$  от 1,02 до 1,1. Дальнейшее увеличение диаметра  $D_{ex3b}$  практически не изменяет максимальную величину силы  $f_{zm}$ . Но за счет увеличения длительности рабочего процесса  $t^*$  увеличивается импульс силы  $F_{zm}$ , что вызывает соответствующий рост критерия эффективности  $\eta^*$ .

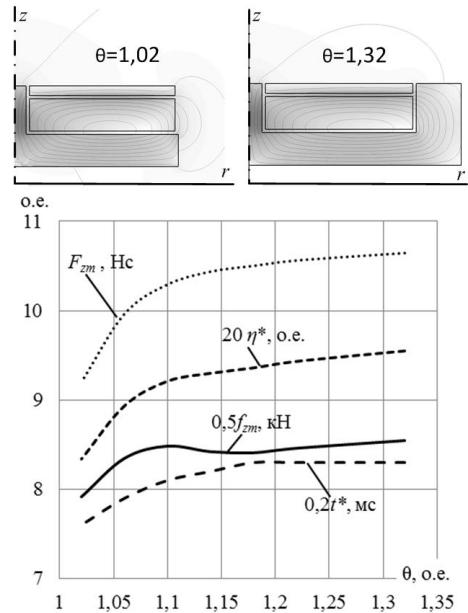


Рис. 13

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИДД

Для проведения экспериментальных исследований ИДД использовался индуктор с тонкостенным (1,2 мм) стальным массивным ФС, выполненным в виде наружной обечайки с нижним диском.

На рис. 14 показаны общий вид (а) и силовые линии магнитного поля при максимальной электродинамической силе (б). Здесь приняты следующие обозначения: 1 – индуктор, 2 – якорь, 3 – ФС, 4 – тоководы индуктора.

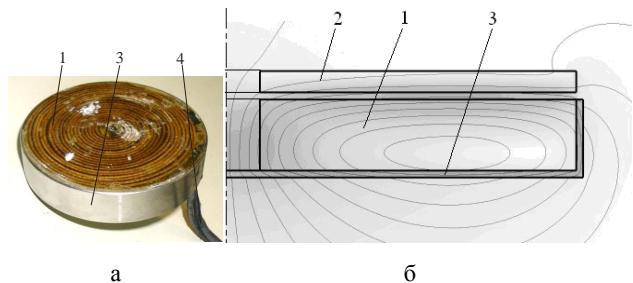


Рис. 14

Как видно из распределения магнитного поля, указанный ФС насыщается и пропускает основное магнитное поле наружу. В сравнении с ИДД без ФС (рис. 1,а) в варианте с тонкостенным ФС распределение магнитного поля изменяется несущественно. Вследствие этого незначительно возрастают и показатели электродинамической силы, представленные на рис. 15 для ИДД без ФС (пунктирные линии) и для ИДД с ФС (сплошные линии). Также наблюдается и увеличение длительности переходного процесса.

Для проведения испытаний использовалась экспериментальная установка, представленная на рис. 16, содержащая акселерометр (вибраакустический датчик) 1, установленный на силовой плате 2, которая при помощи регулируемых упоров 3 прижимается к силовому элементу 4.

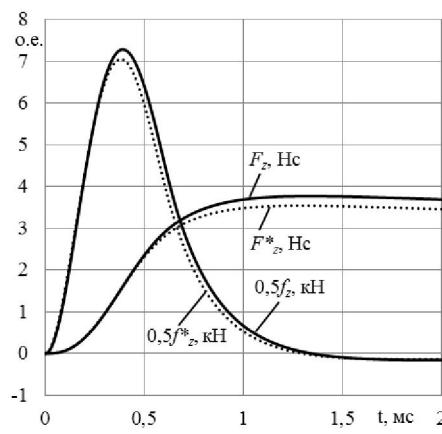
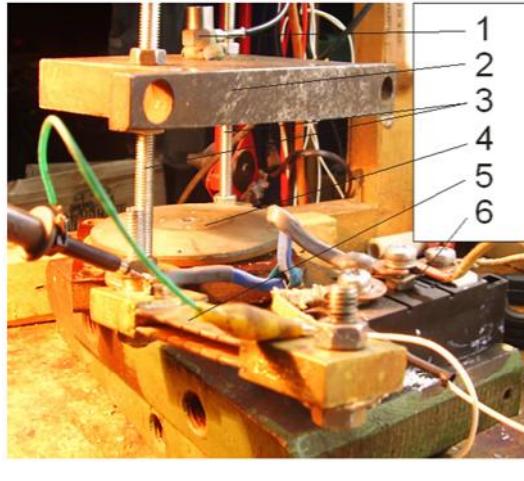
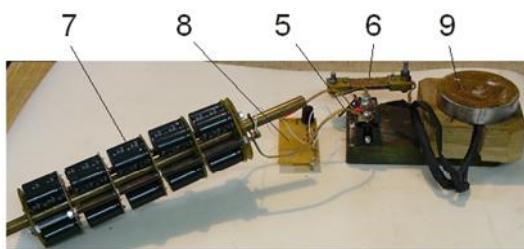


Рис. 15



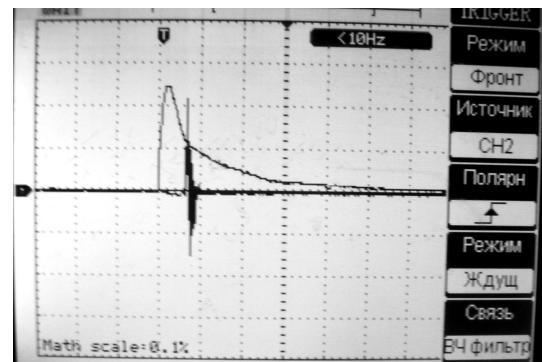
a



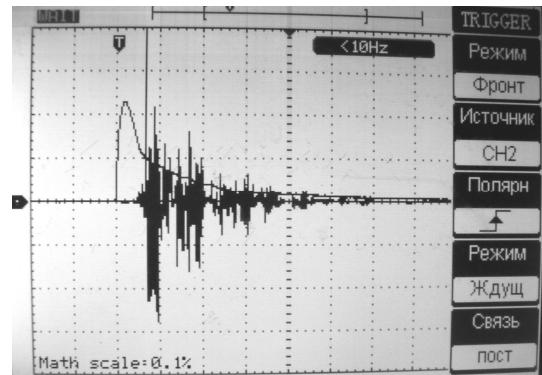
б  
Рис. 16

Измерение токов производилось с использованием токового шунта 5. Транзисторно-диодный блок обеспечивал формирование апериодического импульса тока в индукторе, возбуждение которого осуществлялось от ЕНЭ 7 емкостью  $C=20 \times 330 = 6600$  мкФ с использованием электронной системы управления 8. Индуктор 9 с ФС взаимодействует с силовым элементом 4. На рис. 17 показаны осциллограммы апериодического импульса тока и сигнала акселерометра для ИДД без ФС (рис. 17,а) и для ИДД с ФС (рис. 17,б).

Из полученных осциллограмм следует, что характер токовых импульсов удовлетворительно совпадает с теоретическими расчетами, а именно, ФС уменьшает величину и увеличивает длительность токового импульса. Кроме того, ФС увеличивает силовое воздействие, развиваемое ИДД. Таким образом, экспериментальные испытания подтверждают достоверность основных теоретических положений.



а



б  
Рис. 17

## ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель заторможенного ИДД с ФС. Предложен критерий эффективности, учитывающий комплекс силовых и массогабаритных показателей ИДД.

Проведено математическое моделирование ИДД при различных параметрах ФС. Показано, что при определенных параметрах ФС повышает эффективность ИДД на 30–40% прежде всего за счет повышения силовых показателей. Установлены безразмерные геометрические параметры ФС, равные:  $\chi=1,0$ ,  $\zeta=0,8$ ,  $\theta=1,18$ ,  $9=2,5$  и  $\varepsilon=3,0$ , при которых критерий эффективности достигает максимального значения.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили основные теоретические положения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазуренко М.И., Петухов В.А., Поведайло В.А. и др. Электродинамический импульсный клапан для получения молекулярных пучков // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 2. – С. 152-155.
2. Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д. и др. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования // Молочная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 25-26.
3. Анисимов Г.И. Импульсные способы зачистки остатков смерзшихся грузов // Промышленный транспорт. – 1988. – № 2. – С. 22-25.
4. 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. – P. 262-267.
5. Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L. et al. Improved performance of linear induction launchers // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – Vol. 41, № 1. – P. 171-175.
6. Цицикан Г.Н. Электромагнитное поле и силовые взаимо-

- модействия цилиндрического индуктора с проводящей пластиной при импульсном токе // Электричество. – 1998. – № 9. – С. 52-58.
7. Чемерис В.Т., Васьковский Ю.Н. Нелинейная диффузия электромагнитного поля в массивный якорь индукционного электромеханического преобразователя // Техническая электродинамика. – 1988. – № 2. – С. 101-104.
8. Милорадов И.А. К определению наружного диаметра цилиндрического ферромагнитного якоря импульсного индукционно-динамического преобразователя // Электромагнитные машины ударного действия. – Новосибирск: Ин-т горного дела, Сиб. отд-ние АН СССР. – 1978. – С. 127-128.
9. Ивашин В.В., Карковский Л.И. Выбор рациональной геометрии магнитопровода индукционно-динамического двигателя с немагнитным якорем // Электротехника. – 1981. – № 8. – С. 30-33.
10. Воздвиженский В.А., Сидоров В.А. Характеристики электродинамического привода со стальным магнитопроводом // Электротехника. – 1979. – № 1. – С. 33-37.
11. Антонюк О.А., Бондалетов В.Н., Гусаров А.А. Исследование индукционно-динамических систем с магнитопроводом на ЭВМ // Техническая электродинамика. – 1982. – № 4. – С. 76-81.
12. Чемерис В.Т., Подольцев А.Д. Исследование магнитоимпульсного взаимодействия движущихся проводящих тел при наличии ферромагнитной среды ( $\mu=\text{const}$ ) // Техническая электродинамика. – 1980. – № 1. – С. 16-21.
13. Ивашин В.В., Петунин Ю.П., Евдокимов В.А. Исследование индукционно-динамического двигателя, подмагничиваемого постоянным потоком // Известия вузов. Электромеханика. – 1984. – № 5. – С. 81-85.
14. Васьковский Ю.Н. Математическое моделирование индукционно-динамического двигателя с учетом насыщения его магнитопровода // Электричество. – 1988. – № 11. – С. 60-65.
15. Болюх В.Ф., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С. Высокоэффективный электромеханический преобразователь ударного действия // Электротехника. – 2011. – № 2. – С. 46-53.
16. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 9-14.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mazurenko M.I., Petuhov V.A., Povedajlo V.A. i dr. ‘Elektrodynamiceskij impul’snyj klapan dlya poluchenija molekuljarnyh puchkov’ // Pribory i tekhnika eksperimenta. - 2002. - № 2. - S. 152-155. 2. Kuznecov P.V., Tolmachev N.S., Hartonov V.D. i dr. Indukcionno-dinamicheskaya sistema ochistki sushil’nogo oborudovaniya // Molochnaya promyshlennost’. - 1989. - № 1. - S. 25-26. 3. Anisimov G.I. Impul’snye sposoby zachistki ostatkov smerzshihysa gruzov // Promyshlennyj transport. - 1988. - № 2. - S. 22-25. 4. 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. - P. 262-267. 5. Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L. et al. Improved performance of linear induction launchers // IEEE Transactions on Magnetics. - 2005. - Vol. 41, № 1. - P. 171-175.

6. Cicikyan G.N. ‘Elektromagnitnoe pole i silovye vzaimodejstviya cilindricheskogo induktora s provodyschej plastinoj pri impul’snom toke’ // Elektrichestvo. - 1998. - № 9. - S. 52-58. 7. Chemeris V.T., Vas’kovskij Yu.N. Nelinejnaya diffuziya ‘elektromagnitnogo polya v massivnyj yakor’ indukcionnogo ‘elektromehanicheskogo preobrazovatelya’ // Tehnicheskaya ‘elektrodinamika. - 1988. - № 2. - S. 101-104. 8. Miloradov I.A. K opredeleniju naruzhnogo diametra cilindricheskogo ferromagnitnogo yakorya impul’snogo indukcionno-dinamicheskogo preobrazovatelya // ‘Elektromagnitnye mashiny udarnogo dejstviya. - Novosibirsk: In-t gornogo dela, Sib. otd-nie AN SSSR. - 1978. - S. 127-128. 9. Ivashin V.V., Karkovskij L.I. Vybor racional’noj geometrii magnitoprovoda indukcionno-dinamicheskogo dvigatelya s nemagnitnym yakorem // ‘Elektrotehnika. - 1981. - № 8. - S. 30-33. 10. Vozdvizhenskij V.A., Sidorov V.A. Harakteristiki ‘elektrodynamiceskogo privoda so stal’nym magnitoprovodom’ // ‘Elektrotehnika. - 1979. - № 1. - S. 33-37. 11. Antonyuk O.A., Bondal’ev V.N., Gusarov A.A. Issledovanie indukcionno-dinamicheskikh sistem s magnitoprovodom na ‘EVM’ // Tehnicheskaya ‘elektrodinamika. - 1982. - № 4. - S. 76-81. 12. Chemeris V.T., Podol’cev A.D. Issledovanie magnitoimpul’snogo vzaimodejstviya dvizhuschihysa provodyschih tel pri nalichii ferromagnitnoj sredy ( $\mu=\text{const}$ ) // Tehnicheskaya ‘elektrodinamika. - 1980. - № 1. - S. 16-21. 13. Ivashin V.V., Petunin Yu.P., Evdokimov V.A. Issledovanie indukcionno-dinamicheskogo dvigatelya, podmagnichivaemogo postoyannym potokom // Izvestiya vuzov. ‘Elektromehanika. - 1984. - № 5. - S. 81-85. 14. Vas’kovskij Yu.N. Matematicheskoe modelirovaniye indukcionno-dinamicheskogo dvigatelya s uchetom nasyceniya ego magnitoprovoda // ‘Elektrichestvo. - 1988. - № 11. - S. 60-65. 15. Bolyuh V.F., Luchuk V.F., Rassoha M.A., Schukin I.S. Vysoko’effektivnyj ‘elektromehanicheskij preobrazovatel’ udarnogo dejstviya’ // ‘Elektrotehnika. - 2011. - № 2. - S. 46-53. 16. Bolyuh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Schukin I.S. ‘Energeticheskie processy i ‘effektivnost’ indukcionno-dinamicheskogo preobrazovatelya udarnogo dejstviya’ // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 2. - S. 9-14.

Поступила 29.10.2012

Болюх Владимир Федорович, д.т.н., проф.,  
Олексенко Сергій Владимирович,  
Щукин Ігорь Сергеевич, к.т.н., доц.  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”  
ООО Фірма “ТЭТРА Ltd”,  
61002, Харків, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076427  
e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, tech@tetra.kharkiv.com

Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S.

**Influence of ferromagnetic core parameters on induction-type dynamic motor efficiency.**

A mathematical model of a locked induction-type dynamic motor with a ferromagnetic core is developed. A performance criterion allowing for a set of the motor’s force and dimension indices is introduced. Mathematical modeling of the motor’s processes under various parameters of the ferromagnetic core is carried out. It is shown that, under certain parameters, the core increases the electric motor efficiency by 30-40 %. The core’s geometrical parameters resulting in the maximum efficiency are found. Experimental studies of the motor are made.

**Key words – induction-type dynamic motor, mathematical model, ferromagnetic core.**

## ХРОМОСОМО-ГЕННА ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ НА ПРИКЛАДІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ДЕЗІНТЕГРАТОРІВ

*Обґрунтівється неефективність і непрацездатність електромеханічних дезінтеграторів, розроблених з допомогою хромосомо-генної теорії. Зроблений висновок про безплідність хромосомо-генної теорії в електромеханічній науці.*

*Обосновывается неэффективность и неработоспособность электромеханических дезинтеграторов, разработанных с помощью хромосомо-генной теории. Сделаны выводы о бесплодности хромосомо-генной теории в электромеханической науке.*

Десять років тому вийшла книга проф. Шинкаренка В.Ф. "Основи теорії еволюції електромеханічних систем" – багатограничний труд по хромосомо-генній теорії електромеханічних систем, результат напруженої праці багатьох років. Це викликало повагу. Автор проголосив, що нова хромосомо-генна теорія – найвище досягнення електромеханічної науки за останні 100 років. Всі поспішили одержати книгу з автографом. І всі завмерли в очікуванні. В очікуванні появи на основі генної теорії нових більш технологічно простих електрических машин і апаратів з більш високим ККД, з меншою металоємністю і з меншою питомою витратою активних матеріалів, з покращеними робочими, регулювальними, пусковими характеристиками.

Але жодної фізичної моделі, виконаної в металі і дослідженої, наукова спільнота не побачила, з'являлись тільки у великій кількості "наукові" статті. Розглянемо для прикладу три статті, опубліковані за останній рік [1-3]. Ці статті присвячені електромеханічним дезінтеграторам. Анотація до однієї із статей [3]: "Узагальнено результати геномних і еволюційних досліджень, що науково підтверджують існування генетичних програм структурної еволюції електромеханічних систем. На прикладі функціонального класу електромеханічних дезінтеграторів багатофакторної дії наведено результати ефективного використання генетичних програм в задачах структурного передбачення та інноваційного синтезу нових конкурентоспроможних зразків електромеханічного обладнання". Характерні заголовки підрозділів цієї статті: "Поняття генетичної програми"; "Генетична програма макро-еволюції"; "Генетичні програми мікроеволюційного рівня". В статтях звичайно ж є формули (яка ж наукова стаття без формул), схожі на ієрогліфи невідомої мови, таблиці, що кочують із статті в статтю і заповнені символами, що не пояснюються.

Характерна таблиця 5 [3], яка має назву: "Результати розшифровки структури геному домінуючого Виду ПЛ2.2х і його порівняння з результатами мікроеволюції двообмоткових електромеханічних дезінтеграторів". Підзаголовки цієї таблиці: "Хромосома"; "Генетична інформація і статус хромосоми"; "Генетична формула"; "Наявність об'єкта – потомка".

Ще цитата із статті [2]: "По результатам досліджень створений генетичний банк даних (ГБД), який містить схематизовану високоінтелектуальну інформацію про всі 68 генетично допустимих видів однообмоткових електромеханічних об'єктів, здатних функціонувати на принципі електромагнітної інверсії". Цю цитату слід розуміти так: створена інформація про

68 різного виду електромеханічних дезінтеграторів. Враховуючи, що до цього (до створення інформації) було відомо декілька дезінтеграторів, автор розробив близько 60 – і нових видів дезінтеграторів. За останні два роки автор одержав чотири патенти на корисні моделі по цих нових видах дезінтеграторів [4-7]. На решту більше 50-и, треба думати, автор одержить найближчим часом.

В статтях автор не розглядує ні конструкцію, ні електромагнітні властивості і робочі характеристики запатентованих ним дезінтеграторів, не розглядує і технічні можливості виготовлення дезінтеграторів. Конкретні дані по дезінтеграторах відсутні. Присутня тільки незрозуміла хромосомо-генна "теорія". Ця "теорія" не сприймається і не піддається аналізу. Але завдяки одержаним автором патентам [4-7] є можливість побачити, що насправді створив автор з допомогою своєї "теорії".

В першому патенті [4] замість циліндричної конструкції магнітопроводу, яка взята за прототип (рис. 1), пропонується еліпсовидна конструкція (рис. 2). Обґрутування: в центрі циліндричної конструкції магнітне поле відсутнє, і тому така конструкція неефективна. Але і всередині еліпсовидної конструкції магнітне поле теж буде відсутнє. При номінальних струмах в статорній обмотці, тобто при струмах, при яких обмотка не буде перегріватись зверху допустимої для даного класу ізоляції температури, індукція в повітряному зазорі, що безпосередньо прилягає до магнітопроводу статора, не буде перевищувати 0,1-0,2 Тл, а за кілька міліметрів зменшується до нуля.

Значно більш ефективно дискретні робочі тіла, які повинні здійснювати технологічну обробку матеріалів, що знаходяться в робочій камері, сконцентрувати з допомогою, наприклад, внутрішнього стакану 1 (рис. 3,а), або, ще краще, щоб збільшити індукцію магнітного поля в робочому зазорі, розмістити замість стакана внутрішній феромагнітний статор 1 (рис. 3,б), та, якщо потрібна інверсія, розмістити на зовнішній поверхні статора 1 трифазну обмотку, що створює магнітне поле протилежного напряму обертання порівняно з полем, створюваним зовнішнім статором. Ця конструкція (рис. 3,б) електромагнітно набагато більш ефективна і технологічно незрівнянно більш простіша, ніж патент Шинкаренко В.С. (рис. 2).

В другому патенті [5] пропонується трифазна обмотка, яка утворює зустрічні біжучі магнітні поля (рис. 4,а). Але ж обмотка, у якої числа пазів на полюс і фазу  $q = 0,5$ , не створює біжучого поля. Зобразимо МРС, утворювані цією обмоткою, через інтервали

часу  $t = T/12$  на протязі часу  $t = T/3$ . Як можна бачити із рис. 4,б-е, ніяких біжучих полів не виникає, існують тільки пульсації в кожній із трьох зон.

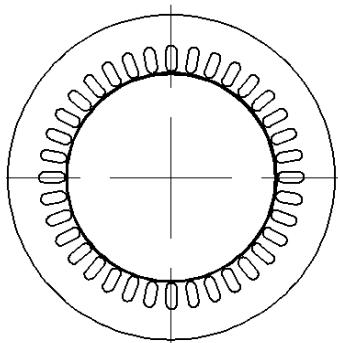


Рис. 1. Прототип

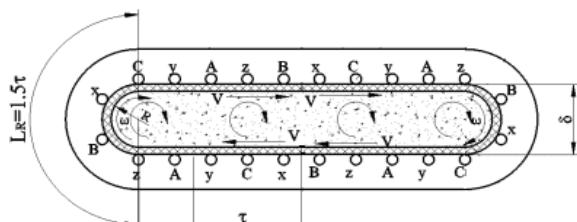


Рис. 2. Еліпсовидний дезінтегратор

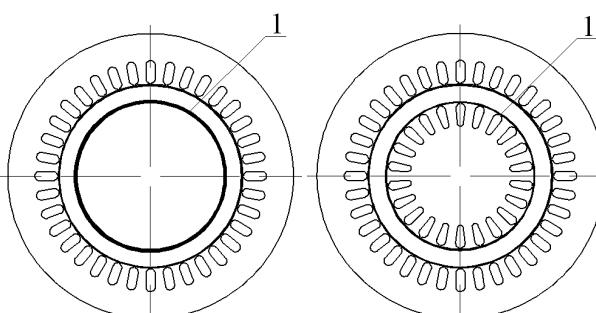


Рис. 3. Удосконалення дезінтегратора

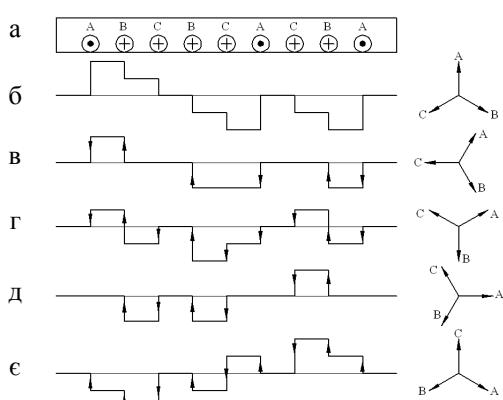


Рис. 4. Трифазна обмотка та її МРС

Запропоновані нераціональні, дилетантські конструкції дезінтеграторів. Однак це не заважає автору стверджувати [3]: "За результатами інноваційного синтезу гомологічних рядів електромеханічних дезінтеграторів всього за два останні роки в технічну еволюцію планово залучені структурні представники 11 нових видів, які по результатам патентування набули

статус реально-інформаційних. В реальних умовах такі еволюційні події відбуваються в часовому інтервалі на протязі 80-100 років". Автор прискорив своїми "науковими" роботами науково-технічний прогрес в 40-50 раз. Відсутністю скромності автор не страждає.

В жодному патенті автор не конкретизує, якої форми повинні бути "феромагнітні дискретні робочі тіла" - кульки, пластинки чи стержні певної довжини та діаметру, кількість цих дискретних тіл в робочій камері. Очевидно, що "дискретні тіла" вслід за біжучим полем вздовж робочої камери рухатись не будуть. Згідно з відомими законами електромеханіки, щоб електропровідні тіла рухались вслід за біжучим магнітним полем, в цих тілах потрібно створити струм певного напряму. "Дискретні тіла" можуть рухатись тільки поперек робочої камери. Виникає запитання, навіщо створювати біжучі поля, використовуючи для цього трифазну обмотку, якщо можна відповідної конфігурації пульсуючі магнітні поля створити більш простою і в даному випадку більш ефективною однофазною обмоткою.

Електромагнітні процеси, що будуть відбуватись в дезінтеграторах, автора не цікавлять, або знаходяться за межами його компетенції.

В патенті [5] прототип – авт. свідоцтво автора 1983 року, в патентах [6] та [7] – авт. свідоцтво автора 1986 року. Автор через 25 років сам себе покращує трьома новими патентами. Виготовлення дезінтеграторів в цих патентах настільки ускладнюється, що практично стає неможливим: це і укладання обмотки в пази суміжних магнітопроводів [5], і виготовлення магнітопроводів, особливо це стосується сферичних: абсолютно без всякої доцільності пропонується сферичний магнітопровід.

Приведу ще одну цитату [3]: "Коректність теоретичних положень перевірялась для домінуючого (найбільшого по чисельності створюваних об'єктів) Виду плоских електромагнітоінверсних електромеханічних дезінтеграторів з двообмотковою активною зоною. Такі електромашинні системи вперше були розроблені, запатентовані і випускались серійно в СКБ ЛЕД (м. Київ) з 1980 по 1991 рр." Але ж СКБ ЛЕД **жодного** дезінтегратора не виготовило і не випустило!

Не виявлено жодної публікації по експериментальному дослідженням хоч якогось електромеханічного дезінтегратора. Можливо, якийсь експериментальний зразок був виготовлений. Але результати його дослідження виявилися настільки невтішними, що автор визнав за краще не оприлюднювати експериментальні дані.

Щоб створити в "дискретних тілах" хоч якісь помітні механічні зусилля, потрібно в обмотку дезінтеграторів подавати надзвичайно великий струм, що в десятки разів перевищує номінальний струм. ККД, який вираховується як відношення можливої механічної роботи "дискретних тіл" до споживаної електричичної енергії: один-декілька відсотків.

Електромеханічні пристрой, розроблювані автором, навіть важко назвати дезінтеграторами в порівнянні з дійсними дезінтеграторами, наприклад, механічними, які в сотні раз більш ефективні [8]. Автор напевно і сам розуміє безперспективність та нікчемність цього напряму, цей напрям йому потрібний для створення статей і нікому не потрібних патентів, і,

звичайно, для підтримування міфу про важливість та необхідність його хромосомо-генної теорії.

Вважаю неприпустимим читання лекцій студентам-електромеханікам з хромосомо-генної теорії, оскільки студенти будуть недоотримувати реальну електромеханічну освіту, потрібну їм в їх майбутній практичній діяльності.

Викликає недовіру і скепсис твердження Шинкаренко В.Ф. (кінець висновків статті [3]): "Пізнання, розробка генетичних банків інновацій і технічна реалізація інноваційного потенціалу генетичних програм, в умовах зростаючої конкуренції та жорстких обмежень на часові і матеріальні ресурси, повинна стати першочерговою задачею фундаментальної і прикладної науки".

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шинкаренко В.Ф., Лисак В.В., Новікова М.М. Спрямований пошук та синтез гомологічних рядів однообмоткових електромеханічних дезінтеграторів багатофакторної дії з інверсними магнітними полями // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 1/2011(13). – С. 63-67.
2. Шинкаренко В.Ф., Лисак В.В. Принципы структурной организации электромеханических объектов с электромагнитной инверсией // Проблемы энергоресурсозбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 1/2011(1). – С. 228-229.
3. Шинкаренко В.Ф., Лисак В.В. Генетические программы структурной эволюции функциональных классов электромеханических систем // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 2. С. 56-62.
4. Патент України на корисну модель №43635, МПК (2009) H02K 41/025, В 01F 13/00. Електромеханічний дезінтегратор / Шинкаренко В.Ф., Августинович А.А., Лисак В.В., Вахновецька М.О. Заявл. 25.03.2009, Опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
5. Патент України на корисну модель № 43940, МПК (2009) H02K 41/025. В 01F 13/00. Електромеханічний пристрій для обробки матеріалів / Шинкаренко В.Ф., Шиманська А.А., Лисак В.В., Вахновецька М.О. Заявл. 03.04.2009, Опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17.
6. Патент України на корисну модель № 57139, МПК (2011.01) H02K 41/025. В 01F 13/00. Електромеханічний дезінтегратор / Шинкаренко В.Ф., Шиманська А.А., Лисак В.В. Заявл. 28.07.2010, Опубл. 10.02.2011, Бюл. № 3.
7. Патент України на корисну модель № 57384, МПК (2011.01) H02K 41/025. В 01F 13/08. Електромеханічний пристрій для обробки матеріалів / Шинкаренко В.Ф., Лисак В.В., Вахновецька М.О. Заявл. 28.07.2010, Опубл. 25.02.2011, Бюл. № 4.
8. Дезінтегратор – взгляд в прошлое или 110 лет эффективного применения ([www.tpridor.ru](http://www.tpridor.ru))

**Bibliography (transliterated):** 1. Shinkarenko V.F. Lisak V.V., Novikova M.M. Spryamovanij poshuk ta sintez gomologichnih ryadiv odnoobmotkovih elektromehanichnih dezintegratoriv bagatofaktornoj dij z inversnimi magnitnimi polyami // Elektromehanichni i energozerigayuchi sistemi. - Kremenchuk: KNU, 2011. - Vip. 1/2011(13). - S. 63-67. 2. Shinkarenko V.F., Lysak V.V. Principy strukturnoj organizacii `elektromehanicheskikh ob`ektorov s `elektromagnitnoj inversiej // Problemy energoresursozberezhennya v elektrotehnichnih sistemah. Nauka, osvita i praktika. Naukove vidannya. - Kremenchuk: KNU, 2011. - Vip. 1/2011(1). - S. 228-229. 3. Shinkarenko V.F., Lysak V.V. Geneticheskie programmy strukturnoj `evolyucii funkciona`nyh klassov `elektromehanicheskikh sistem // Elektrotehnika i elektromehanika. -2012. - № 2. S. 56-62. 4. Patent Ukrainsi na korisnu model' №43635, MPK (2009) N02K 41/025, V 01F 13/00. Elektromehanichnjij dezintegrator / Shinkarenko V.F., Avgustinovich A.A., Lisak V.V., Vahnovec'ka M.O. Zayavl. 25.03.2009, Opubl. 25.08.2009, Byul. № 16. 5. Patent Ukrainsi na korisnu model' № 43940, MPK (2009) N02K 41/025. V 01F 13/00. Elektromehanichnjij pristrij dlya obrabki materialiv / Shinkarenko V.F., Shimans'ka A.A., Lisak V.V., Vahnovec'ka M.O. Zayavl. 03.04.2009, Opubl. 10.09.2009, Byul. № 17. 6. Patent Ukrainsi na korisnu model' № 57139, MPK (2011.01) N02K 41/025. V 01F 13/00. Elektromehanichnjij dezintegrator / Shinkarenko V.F., Shimans'ka A.A., Lisak V.V. Zayavl. 28.07.2010, Opubl. 10.02.2011, Byul. № 3. 7. Patent Ukrainsi na korisnu model' № 57384, MPK (2011.01) N02K 41/025. V 01F 13/08. Elektromehanichnjij pristrij dlya obrabki materialiv / Shinkarenko V.F., Lisak V.V., Vahnovec'ka M.O. Zayavl. 28.07.2010, Opubl. 25.02.2011, Byul. № 4. 8. Dezintegrator` - vzglyad v proshloe ili 110 let `effektivnogo primeneniya ([www.tpridor.ru](http://www.tpridor.ru))

Надійшла 20.06.2012

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

Донбаський державний технічний університет  
кафедра електричних машин та апаратів,  
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16,  
тел.: (06442) 2-31-23, e-mail: [info@dgmi.edu.ua](mailto:info@dgmi.edu.ua)

Lushchyk V.D.

#### A chromosomal-genetic theory of electromechanical systems by the example of electromechanical disintegrators.

Inefficiency and nonserviceability of the electromechanical disintegrators developed by means of a chromosomal-genetic theory is justified. Conclusions are made about futility of the chromosomal-genetic theory in electromechanical science.

**Key words – chromosomal-genetic theory, electromechanical disintegrators, three-phase winding, futility.**

## АНАЛИЗ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

*Експериментально підтверджено коректність математичної моделі неусталених режимів роботи асинхронного двигуна при фазовому управлінні. Досліджено як електричні та механічні параметри, так і енергетичні показники.*

*Экспериментально подтверждена корректность математической модели неуставновившихся режимов работы асинхронного двигателя при фазовом управлении. Исследованы как электрические и механические параметры, так и энергетические показатели.*

### ВВЕДЕНИЕ

Параметрическое фазовое управление асинхронным двигателем (АД), реализуемое в системах регулируемого асинхронного электропривода "тиристорный преобразователь напряжения (ТПН) – АД", позволяет осуществлять управляемые пускотормозные и реверсивные режимы, а также регулирование скорости некоторых нагрузочных механизмов, в частности турбомеханизмов, в зависимости от требований технологии и энергосбережения [1, 2]. Электропривода с таким управлением имеют низкую стоимость и высокую надежность. Математические модели (ММ), описывающие динамические режимы, должны учитывать специфику работы двигателя в приводах с параметрическим фазовым управлением, заключающуюся в несинусоидальности питающего напряжения переменной величины и изменениях параметров схем замещения, связанных с насыщением магнитной цепи и вытеснением тока в обмотке ротора. При анализе работы АД в динамических режимах может быть использован значительный опыт по исследованию переходных процессов в асинхронных машинах [3].

Каждая высшая временная гармоническая (ВВГ), питающего двигатель напряжения, создает ряд высших пространственных гармонических (ВПГ). В некоторых работах рассматривается учет ВВГ при анализе установившихся и динамических режимов регулируемых асинхронных двигателей (РАД) [4,5,6]. При учете совокупного влияния высших пространственно-временных гармоник (ВПВГ) обеспечивается корректировка механических характеристик РАД [7], уточнение энергетических и тепловых показателей в уставновившихся режимах работы [8].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Учет совокупного влияния ВПВГ на характеристики РАД в переходных режимах возможно осуществить используя подход, изложенный в [3, 9]. Согласно нему РАД в системе преобразованных координат может быть описан системой дифференциальных уравнений, составленных для каждого условного двигателя, питаемого напряжением соответствующей ВПВГ, совокупностью которых заменяется реальный двигатель, т.е. для каждой учитываемой ВПВГ. В матричном виде уравнения представляются так:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{s\alpha v}(t) &= \mathbf{u}_{s\alpha v}(t) - \mathbf{r}_{sv} \times \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\quad \times [\mathbf{x}_{rv}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{s\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{r\alpha v}(t)], \\ \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{s\beta v}(t) &= \mathbf{u}_{s\beta v}(t) - \mathbf{r}_{sv} \times \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\quad \times [\mathbf{x}_{rv}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{s\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{r\beta v}(t)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{r\alpha v}(t) &= -p \cdot \omega_p \times \boldsymbol{\Psi}_{r\beta v}(t) - \mathbf{r}_{rv}(t) \times \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\quad \times [\mathbf{x}_{sv}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{r\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{s\alpha v}(t)], \\ \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{r\beta v}(t) &= p \cdot \omega_p \times \boldsymbol{\Psi}_{r\alpha v}(t) - \mathbf{r}_{rv}(t) \times \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\quad \times [\mathbf{x}_{sv}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{r\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{s\beta v}(t)], \\ \frac{d}{dt} \omega_p &= \frac{1}{J} \left\{ \frac{3p}{2} \left[ \begin{array}{l} \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \mathbf{d}_v(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{s\beta v}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{r\alpha v}(t) - \\ - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \mathbf{d}_v(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{s\alpha v}(t) \times \boldsymbol{\Psi}_{r\beta v}(t) \end{array} \right] - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - M_c(\omega_p) \right\}, \end{aligned}$$

где включаемые матрицы являются двумерными,  $\boldsymbol{\Psi}_{s\alpha v}(t)$ ,  $\boldsymbol{\Psi}_{s\beta v}(t)$ ,  $\boldsymbol{\Psi}_{r\alpha v}(t)$ , и  $\boldsymbol{\Psi}_{r\beta v}(t)$  – матрицы потокосцеплений статорных и роторных обмоток машины, соответственно по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\omega_r$  – угловая частота вращения вала;  $p$  – число пар полюсов;  $J$  – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя;  $M_c(\omega_p)$  – зависимость момента сопротивления механизма от частоты вращения  $\omega_p$ ;  $\mathbf{r}_{sv}$ ,  $\mathbf{r}_{rv}(t)$ ,  $\mathbf{x}_{sv}(t)$ ,  $\mathbf{x}_{rv}(t)$ ,  $\mathbf{x}_{Mv}(t)$  – матрицы активных и реактивных сопротивлений обмоток статора и ротора и сопротивлений взаимоиндукции, причем все они, за исключением  $\mathbf{r}_{sv}$  изменяются на каждом шаге интегрирования;  $\mathbf{d}_v(t)$  – матрицы вспомогательных переменных  $\mathbf{d}_v(t) = [\mathbf{x}_{sv}(t) \mathbf{x}_{rv}(t) - (\mathbf{x}_{Mv}(t))^2]^T$ ;  $\mathbf{u}_{s\alpha v}(t)$  и  $\mathbf{u}_{s\beta v}(t)$  – матрицы мгновенных значений напряжений по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , которые определяются амплитудами напряжений  $\mathbf{U}_{mv}$  и угловых положений обобщенных векторов напряжений  $\phi_{1v}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{s\alpha v}(t) &= \mathbf{U}_{mv}(t) \cdot \cos(\phi_{1v}), \\ \mathbf{u}_{s\beta v}(t) &= \mathbf{U}_{mv}(t) \cdot \sin(\phi_{1v}), \end{aligned}$$

при этом система дополняется еще одним дифференциальным уравнением:

$$\frac{d}{dt} \phi_{1v} = \omega_{1v},$$

где  $\omega_{1v}$  – матрица, содержащая угловые частоты вращения соответствующих гармоник.

Выражения, связывающие матрицы мгновенных значений токов и потокосцеплений, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{s\alpha v}(t) &= \mathbf{d}_v(t) \cdot [\mathbf{x}_{rv}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}_{s\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}_{r\alpha v}(t)], \\ \mathbf{i}_{s\beta v}(t) &= \mathbf{d}_v(t) \cdot [\mathbf{x}_{rv}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}_{s\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}_{r\beta v}(t)], \end{aligned}$$

где  $\mathbf{i}_{s\alpha v}$ ,  $\mathbf{i}_{s\beta v}$  – матрицы токов статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ .

Действующее значение тока статора

$$i_{1v}(t) = \sqrt{\frac{\mathbf{i}_{s\alpha v}(t)^2 + \mathbf{i}_{s\beta v}(t)^2}{2}}.$$

В каждом из уравнений имеют место нелинейные коэффициенты – параметры условных двигателей основной гармоники и ВПВГ, изменяющиеся в каждой рабочей точке вследствие явлений насыщения

магнитной системы и вытеснения тока в обмотке ротора. Предлагаемый подход к анализу динамических характеристик АД предполагает предварительное определение этих коэффициентов для необходимых рабочих точек диапазона регулирования. Поэтому до анализа переходного процесса проводятся расчеты установившихся режимов с целью получения значений всех параметров схем замещения основной гармоники и ВПВГ с учетом вытеснения токов в обмотке ротора и насыщения магнитопровода для необходимых рабочих точек диапазона регулирования. Для этого используются ММ установившихся режимов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования пуска АД с определенной интенсивностью изменения параметра регулирования (угла открытия тиристоров ТПН  $\alpha$ , или, соответственно, напряжения на двигателе). Двигатель 4AX80АБУ3 пытался от тиристорного преобразователя напряжения типа "Климатика". Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 380 В. Мгновенные значения

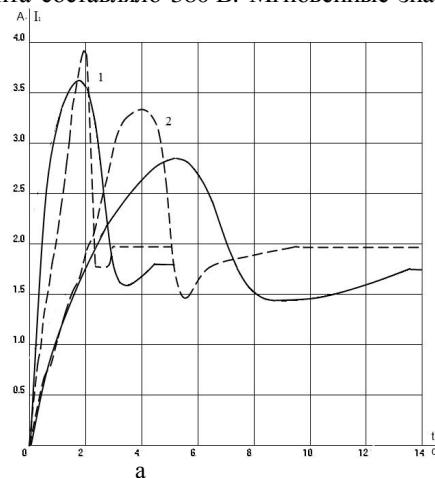


Рис. 1. Ток, потребляемый двигателем (а) и расчетный электромагнитный момент (б) двигателя при пуске.  
Интенсивность нарастания угла открытия тиристоров: 1 – 15 град/с; 2 – 33 град/с

Потребляемая двигателем условная активная мощность в динамических режимах рассчитывается через матрицы напряжений и токов, учитывающие в гармонических составляющих

$$P'_1 = \frac{3}{2} \cdot [U_{s\alpha v} \cdot I_{s\alpha v} + U_{s\beta v} \cdot I_{s\beta v}]$$

Реальная потребляемая активная мощность  $P_1$  больше условной на величину суммы неучтенных потерь (в стали магнитопровода, добавочных, механических)

$$P_1 = P'_1 + \Delta P_{cm\ osn} + \Delta P_{cm\ dob} + \Delta P_{mex} + \Delta P_{dob}$$

Мощность на валу двигателя может быть определена через матрицы потокосцеплений и токов с использованием значения частоты вращения ротора

$$P_2 = \omega_p \cdot \frac{3p}{2} \cdot [I_{s\beta v} \cdot \Psi_{s\alpha v} - I_{s\alpha v} \cdot \Psi_{s\beta v}] - \Delta P_{mex} - \Delta P_{dob}$$

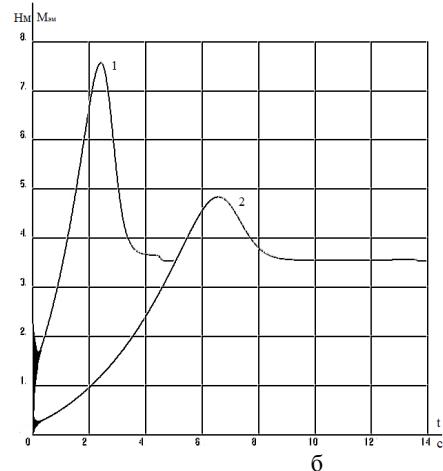
Мгновенное значение КПД определяется отношением мгновенных значений полезной мощности на валу двигателя  $P_2$  к потребляемой активной мощности  $P_1$ .

Электрические потери в обмотках АД в динамических режимах

$$\begin{aligned} \Delta P_{el\Sigma} &= \Delta P_{el1} + \Delta P_{el2} = \\ &= \frac{3}{2} \cdot \left( (r_{sv} \cdot I_{s\alpha v}) \cdot I_{s\alpha v} + (r_{sv} \cdot I_{s\beta v}) \cdot I_{s\beta v} + \right. \\ &\quad \left. + (r_{rv}(t) \cdot I_{r\alpha v}) \cdot I_{r\alpha v} + (r_{rv}(t) \cdot I_{r\beta v}) \cdot I_{r\beta v} \right) \end{aligned}$$

ния токов и напряжений фиксировались с помощью цифрового многоканального осциллографа. Момент инерции двигателя с нагрузочным механизмом составлял 0,1 кг·м<sup>2</sup>. Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от числа оборотов, что описывалась следующим уравнением:  $M(n) = 0,3 + 0,0003 \cdot n$ . Исследования были проведены при интенсивностях нарастания угла открытия тиристоров 15 град/с и 33 град/с, что примерно соответствует интенсивностям нарастания напряжения на двигателе 20 В/с и 50 В/с.

Рассматриваемые математические модели легли в основу расчетной программы [10], с помощью которой были выполнены теоретические исследования нестационарных режимов двигателя, работающего при фазовом управлении. При данном исследовании принимались во внимание пространственные и временные гармоники порядков 1, 5, 7, 11, 13. На рис. 1 представлены результаты теоретических (сплошной линией) и экспериментальных (пунктиром) исследований – тока, потребляемого двигателем, и расчетного электромагнитного момента при пуске двигателя.



Потребляемая двигателем условная полная мощность в динамических режимах также определяется через матрицы напряжений и токов

$$S'_1 = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{[U_{s\alpha v} \cdot U_{s\alpha v} + U_{s\beta v} \cdot U_{s\beta v}] \times [I_{s\alpha v} \cdot I_{s\alpha v} + I_{s\beta v} \cdot I_{s\beta v}]}$$

Полная мощность при несинусоидальном питании состоит из активной, реактивной мощностей, мощности искажения. Сумма квадратов потребляемых двигателем реактивной мощности  $Q_1$  и мощности искажения  $T_1$

$$Q_1^2 + T_1^2 = S'_1^2 - P_1^2$$

Реальная потребляемая двигателем полная мощность с учетом всех потерь

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T_1^2} = \sqrt{P_1^2 + S'_1^2 - P_1^2}$$

Величина мгновенного значения коэффициента мощности  $\chi$  определяется как отношение мгновенных значений потребляемой активной мощности  $P_1$  к реально потребляемой двигателем полной мощности  $S_1$ .

На рис. 2 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований энергетических показателей пуска двигателя.

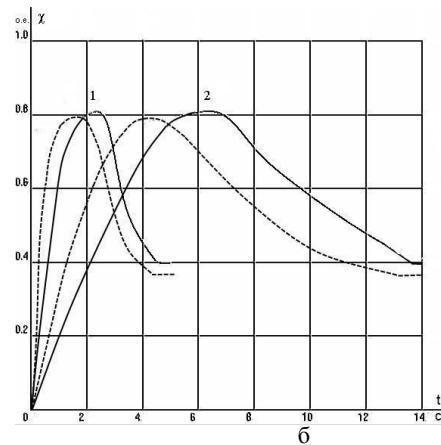
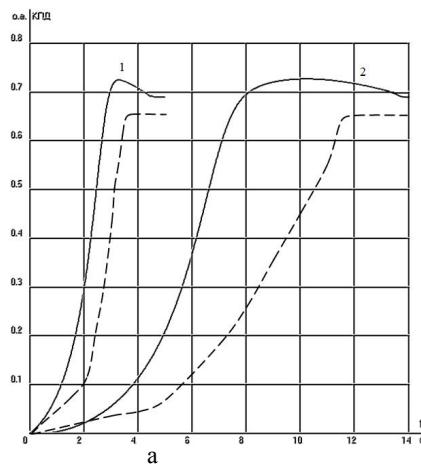


Рис. 2. Энергетические показатели двигателя при пуске: КПД (а) и коэффициент мощности (б).  
Интенсивность нарастания угла открытия тиристоров: 1 – 15 град/с; 2 – 33 град/с

## ВЫВОДЫ

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- Теоретически и экспериментально подтверждено, что с уменьшением интенсивности изменения параметра регулирования броски тока, потребляемого двигателем, существенно снижаются, а продолжительность пуска увеличивается.

- Броски энергетических показателей не зависят от интенсивности изменения параметра регулирования. Характер экспериментальных и расчетных характеристик идентичен.

- По окончанию пуска исследуемые показатели устанавливаются на значениях, соответствующих значениям установившихся режимов.

Аналогичным образом исследуемые показатели могут быть рассчитаны при других условиях пуска (различные нагрузки на валу, моменты инерции, интенсивности нарастания, параметра регулирования и др.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
- Петров Л.П., Андрющенко О.А., Капинос В.И. и др. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
- Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
- Глухивский Л.И., Биляковский И.Е. Расчет установившегося режима АД при его несинусоидальном питании // Техн. электродин. – 1988. – № 5. – С. 57-60.
- Петрушин В.С. Влияние высших гармонических напряжения на характеристики асинхронного двигателя в электроприводе с фазовым управлением. Труды Одесского политехнического университета.– Вып. 1. – 1997.– С. 214-218.
- Петрушин В.С., Якимец А.М. Исследование энергетических показателей асинхронных двигателей в динамических режимах при параметрическом управлении // Технична електродинаміка. – 2001. – № 5. – С. 50-52.
- Петрушин В.С., Якимец А.М., Петрушина З.В. Корректировка расчета механических характеристик асинхронных двигателей при фазовом управлении // Всеукр. науч.-техн. конф. "Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів – ПАЕТЗ-2005". – Миколаїв: 2005. – Т. 2. – С. 164-169.
- Петрушин В.С., Якимец А.М., Груша А.В, Каленик О.В. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственно-временных гармоник // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб. – Вип. 70. – 2008. – С. 68-71.
- Петрушин В.С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" // Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.

10. 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 ПАН№4065). Киев: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

**Bibliography (transliterated):** 1. Braslavskij I.Ya. Asinhronnyj poluprovodnikovyj elektroprivod s parametricheskim upravleniem. - M.: Energoatomizdat, 1988. - 224 s. 2. Petrov L.P., Andryuschenko O.A., Kapinos V.I. i dr. Tiristornye preobrazovateli napryazheniya dlya asinhronnogo elektroprivoda. - M.: Energoatomizdat, 1986. - 200 s. 3. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin. - M.: Vysshaya shkola, 1987. - 248 s. 4. Gluhivskij L.I., Bilyakovskij I.E. Raschet ustannovivshegosya rezhima AD pri ego nesinusoidal'nom pitanii // Tehn. elektroprivod. - 1988. - № 5. - S. 57-60. 5. Petrushin V.S. Vliyanie vysshih garmonicheskikh napryazheniya na harakteristiki asinhronnogo dvigatelya v elektroprivode s fazovym upravleniem. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. - Vyp. 1. - 1997. - S. 214-218. 6. Petrushin V.S., Yakimets A.M. Issledovanie energeticheskikh pokazatelej asinhronnyh dvigatelej v dinamicheskikh rezhimah pri parametricheskem upravlenii // Tehnickna elektroprivodnaya. - 2001. - № 5. - S. 50-52. 7. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Petrushina Z.V. Korrektirovka raspredelenija mehanicheskikh harakteristik asinhronnyh dvigatelej pri fazovom upravlenii // Vseukr. nauk.-tehn. konf. "Problemi avtomatiki ta elektroobladnannya transportnih zasobiv - PAETZ-2005". - Mikolajiv: 2005. - T. 2. - S. 164-169. 8. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Grusha A.V., Kalenik O.V. Energeticheskie i teplovye pokazateli reguliruemyh asinhronnyh dvigatelej s uchetom vysshih prostorivremennych гармоник // Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya: Mizvid. nauk.-tehn. zb. - Vip. 70. - 2008. - S. 68-71. 9. Petrushin V.S. Uchebnoe posobie "Asinhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode" // Odessa: Nauka i tekhnika, 2006. - 320s. 10. Petrushin V.S., Ryabinin S.V., Yakimets A.M. Programmyj produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnyh korotkozamknutyh dvigatelej sistem reguliruemogo elektroprivoda (svidetel'stvo o registraciї programmy PАН№4065). Kiev: Ministerstvo obrazovaniya i nauki Ukrayni. Gosudarstvennyj departament intellektual'noj sobstvennosti, 26.03.2001.

Поступила 17.09.2012

Петрушин Виктор Сергеевич, д.т.н., проф.,  
Якимец Андрей Миронович, к.т.н., доц.,  
Бангула Владимир Борисович  
Одесский национальный политехнический университет  
кафедра "Электрические машины"  
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1  
тел. (048) 7348494, e-mail: victor\_petrushin@ukr.net

Petrushin V.S., Yakimets A.M., Bangula V.B.  
**Analysis of a thyristor voltage converter fed induction motor start.**

A mathematical model of transient modes of asynchronous motor operation under phase control is experimentally confirmed to be valid. Both electrical and mechanical parameters and energy data are studied.

**Key words – thyristor voltage converter, induction motor, smooth starting.**

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ И ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ПОЛИНОМОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫХОДНЫХ ЦЕПЯХ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ

*Проведено порівняльний аналіз зручності використання алгебраїчних і гіперболічних поліномів, які апроксимують залежність опору гранулюваних струмопровідних середовищ від струму, що в них протікає при розрахунку переходних процесів у вихідних колах разрядно-імпульсних систем.*

*Проведен сравнительный анализ удобства использования алгебраических и гиперболических полиномов, аппроксимирующих зависимость сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них тока при расчете переходных процессов в выходных цепях разрядно-импульсных систем.*

### ВВЕДЕНИЕ

При анализе переходных процессов в электрических цепях широкое распространение получили аппроксимации нелинейных характеристик реальных нагрузок алгебраическими полиномами. Преимуществом алгебраических полиномов является то, что они легко интегрируются и дифференцируются, а также не содержат особых точек. В [1] показано, что при аппроксимации зависимости сопротивлений гранулированных сред от протекающего в них тока наибольшие точность и диапазон интерполяции обеспечивают гиперболические ряды. Данные ряды также хорошо интегрируются и дифференцируются, однако содержат особую точку при нулевом значении аргумента. Одним из способов избежать данной точки является добавление к модулю аргумента бесконечно малой величины. В представленной работе сравним удобство применения алгебраических и гиперболических полиномов, аппроксимирующих зависимость сопротивления гранулированных сред от протекающего в них тока, с точки зрения решения дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в выходных цепях разрядно-импульсных систем.

### 1. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ЦЕПИ

На текущий момент в технологических процессах искроэрозионной обработки гранулированных токопроводящих сред наибольшее распространение получили генераторы импульсов с емкостными накопителями электрической энергии [2].

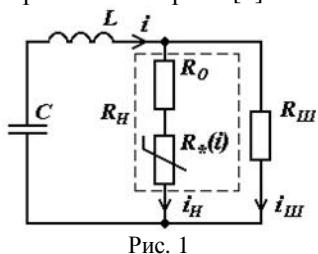


Рис. 1

Эквивалентная схема замещения выходной цепи такого генератора с замкнутым разрядным коммутатором представлена на рис. 1. Емкостной накопитель на рис. 1 обозначен  $C$ , индуктивность соединительных кабелей –  $L$ , сопротивление нагрузки –  $R_H$ , его постоянная составляющая –  $R_0$ , зависящая от тока составляющая –  $R_*(i)$ , сопротивление шунтирующего нагружку резистора –  $R_W$ , ток в нем –  $i_W$ , ток емкостного накопителя –  $i$ , а ток нагрузки –  $i_H$ .

Резистор  $R_W$  необходим для обеспечения безаварийных режимов работы генераторов с зарядным и разрядным тиристорными коммутаторами при самопроизвольном возрастании сопротивления нагрузки  $R_H$  в несколько раз [3].

### 2. АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ АППРОКСИМАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ АЛГЕБРАИЧЕСКИМ ПОЛИНОМОМ

Зависимость эквивалентного электрического сопротивления гранулированной среды от протекающего в ней тока можно аппроксимировать алгебраическим полиномом [1]:

$$\begin{aligned} R_H &= a_0 + a_1 i_H + a_2 i_H^2; \\ R_0 &= a_0; \\ R_* &= a_1 i_H + a_2 i_H^2. \end{aligned} \quad (1)$$

С учетом того, что при такой аппроксимации напряжение на нелинейной составляющей нагрузки будет  $i_H R_* = a_1 i_H^2 + a_2 i_H^3$  его первая производная примет вид  $\frac{d(i_H R_*)}{dt} = \frac{di_H}{dt} (2a_1 i_H + 3a_2 i_H^2)$ , а вторая, соответственно

$$\frac{d^2(i_H R_*)}{dt^2} = \frac{d^2 i_H}{dt^2} (2a_1 i_H + 3a_2 i_H^2) + \left( \frac{di_H}{dt} \right)^2 (2a_1 + 6a_2 i_H)$$

и обозначения:

$$\begin{aligned} R_A &= R_0 R_W / (R_0 + R_W); \\ R_W / (R_0 + R_W) &= R_A / R_0. \end{aligned} \quad (2)$$

уравнение, описывающее переходной процесс в цепи рис. 1 примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_H}{dt^2} + \frac{R_A}{L} \frac{di_H}{dt} + \omega_0^2 i_H + \frac{R_A}{R_0} \left[ \frac{1}{R_W} \cdot \frac{d^2 i_H}{dt^2} (2a_1 i_H + 3a_2 i_H^2) + \right. \\ \left. \frac{1}{R_W} \cdot \left( \frac{di_H}{dt} \right)^2 (2a_1 + 6a_2 i_H) + \frac{1}{L} \cdot \frac{di_H}{dt} (2a_1 i_H + 3a_2 i_H^2) + \right. \\ \left. + \frac{\omega_0^2}{R_W} (a_1 i_H^2 + a_2 i_H^3) \right] = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

При записи (3) учитывалось, что

$$i = i_H \frac{R_0 + R_W}{R_W} + \frac{1}{R_W} (a_1 i_H^2 + a_2 i_H^3). \quad (4)$$

Начальные условия в этом случае имеют вид:

$$i_H|_{t=0} = 0, \quad \frac{di_H}{dt}|_{t=0} = \frac{-Q_0 \omega_0^2 R_W}{R_0 + R_W}. \quad (5)$$

Уравнение (3) является нелинейным и не решается методами прямого дифференцирования. Поэтому для его решения применим метод малого параметра [4]. В качестве малого параметра выберем:

$$\varepsilon = \frac{R_W}{R_0 + R_W} = \frac{R_A}{R_0} < 1. \quad (6)$$

Ток в нагрузке представим в виде асимптотического ряда по степеням малого параметра:

$$i_H = i_0 + \varepsilon i_1 + \varepsilon^2 i_2 + \dots \quad (7)$$

Ненулевые начальные условия будем учитывать только в порождающем решении. Уравнение при  $\varepsilon^0$  принимает вид:

$$\frac{d^2 i_0}{dt^2} + \frac{R_A}{L} \cdot \frac{di_0}{dt} + \omega_0^2 i_0 = 0, \quad (8)$$

а порождающее решение:

$$i_0 = C_{10} e^{\lambda_1 t} + C_{20} e^{\lambda_2 t}, \quad (9)$$

$$\text{где } \lambda_{1,2} = -\frac{R_A}{2L} \pm \sqrt{\frac{R_A^2}{4L^2} - \omega_0^2}. \quad (10)$$

В уравнении (10) знак "+" учитывается при  $\lambda_1$ , а знак "-" – при  $\lambda_2$ . С учетом начальных условий (5) находим постоянные интегрирования:

$$C_{10} = -C_{20} = \frac{Q_0 \omega_0^2 R_A}{(\lambda_2 - \lambda_1) R_0} = K_0. \quad (11)$$

Нулевое приближение по току нагрузки (порождающее решение) принимает вид:

$$i_0 = K_0 (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}). \quad (12)$$

Запишем уравнение при  $\varepsilon^1$ :

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{R_A}{L} \frac{di_1}{dt} + \omega_0^2 i_1 = \\ & = - \left[ \frac{d^2 i_0}{dt^2} \frac{(2a_1 i_0 + 3a_2 i_0^2)}{R_\phi} + \left( \frac{di_0}{dt} \right)^2 \frac{(2a_1 + 6a_2 i_0)}{R_\phi} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{L} \cdot \frac{di_0}{dt} \left( 2a_1 i_0 + 3a_2 i_0^2 \right) + \frac{\omega_0^2}{R_\phi} (a_1 i_0^2 + a_2 i_0^3) \right] = F_1(t). \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом (12) можем записать:

$$\begin{aligned} F_1(t) = & M_{11} e^{2\lambda_1 t} + M_{12} e^{2\lambda_2 t} + M_{13} e^{(\lambda_1 + \lambda_2)t} + M_{21} e^{3\lambda_1 t} + \\ & + M_{22} e^{3\lambda_2 t} + M_{23} e^{(2\lambda_1 + \lambda_2)t} + M_{24} e^{(\lambda_1 + 2\lambda_2)t}; \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} M_{11} = & -a_1 K_0^2 \left( \frac{4}{R_\phi} \lambda_1^2 + \frac{2}{L} \lambda_1 + \frac{\omega_0^2}{R_\phi} \right); \\ M_{12} = & -a_1 K_0^2 \left( \frac{4}{R_\phi} \lambda_2^2 + \frac{2}{L} \lambda_2 + \frac{\omega_0^2}{R_\phi} \right); \\ M_{21} = & -a_2 K_0^3 \left( \frac{9}{R_\phi} \lambda_1^2 + \frac{3}{L} \lambda_1 + \frac{\omega_0^2}{R_\phi} \right); \\ M_{13} = & 2a_1 K_0^2 \left( \frac{1}{R_\phi} (\lambda_1 + \lambda_2)^2 + \frac{1}{L} (\lambda_1 + \lambda_2) + \frac{\omega_0^2}{R_\phi} \right); \\ M_{22} = & a_2 K_0^3 \left( \frac{9}{R_\phi} \lambda_2^2 + \frac{3}{L} \lambda_2 + \frac{\omega_0^2}{R_\phi} \right); \\ M_{23} = & 3a_2 K_0^3 \left( \frac{1}{R_\phi} (3\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 2\lambda_1 \lambda_2) + \frac{1}{L} (2\lambda_1 + \lambda_2) + \frac{\omega_0^2}{R_\phi} \right); \\ M_{24} = & -3a_2 K_0^3 \left( \frac{1}{R_\phi} (\lambda_1^2 + 3\lambda_2^2 + 2\lambda_1 \lambda_2) + \frac{1}{L} (\lambda_1 + 2\lambda_2) + \frac{\omega_0^2}{R_\phi} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Решением уравнения (13) будет:

$$i_1 = C_{11} e^{\lambda_1 t} + C_{21} e^{\lambda_2 t} + i_{1H}. \quad (16)$$

Поскольку  $F_1(t)$  является суммой нескольких экспоненциальных функций, применим свойство неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными

коэффициентами [5] и представим частное решение уравнения (13) в виде суммы частных решений:

$$\begin{aligned} i_{1H} = & A_{11} e^{2\lambda_1 t} + A_{12} e^{2\lambda_2 t} + A_{13} e^{(\lambda_1 + \lambda_2)t} + A_{21} e^{3\lambda_1 t} + \\ & + A_{22} e^{3\lambda_2 t} + A_{23} e^{(2\lambda_1 + \lambda_2)t} + A_{24} e^{(\lambda_1 + 2\lambda_2)t}. \end{aligned} \quad (17)$$

В (17) значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} A_{11} = & \frac{M_{11}}{\varphi(2\lambda_1)}; \quad A_{12} = \frac{M_{12}}{\varphi(2\lambda_2)}; \quad A_{13} = \frac{M_{13}}{\varphi(\lambda_1 + \lambda_2)}; \\ A_{21} = & \frac{M_{21}}{\varphi(3\lambda_1)}; \quad A_{22} = \frac{M_{22}}{\varphi(3\lambda_2)}; \quad A_{23} = \frac{M_{23}}{\varphi(2\lambda_1 + \lambda_2)}; \\ A_{24} = & \frac{M_{24}}{\varphi(\lambda_1 + 2\lambda_2)} \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi(2\lambda_1) = & -2 \frac{R_A}{L} \lambda_1 - 3\omega_0^2; \quad \varphi(2\lambda_2) = -2 \frac{R_A}{L} \lambda_2 - 3\omega_0^2; \\ \varphi(\lambda_1 + \lambda_2) = & \omega_0^2; \quad \varphi(3\lambda_1) = -6 \frac{R_A}{L} \lambda_1 - 8\omega_0^2; \\ \varphi(2\lambda_2) = & -6 \frac{R_A}{L} \lambda_2 - 8\omega_0^2; \quad \varphi(2\lambda_1 + \lambda_2) = -2 \frac{R_A}{L} \lambda_1; \\ \varphi(\lambda_1 + 2\lambda_2) = & -2 \frac{R_A}{L} \lambda_2; \end{aligned} \quad (19)$$

- значения характеристического уравнения цепи при определенных аргументах. Постоянные интегрирования находим при помощи метода Крамера [5]:

$$C_{11} = \frac{B_2 - B_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}; \quad C_{21} = \frac{B_1 \lambda_1 - B_2}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

$$\text{где } B_1 = A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{21} + A_{22} + A_{23} + A_{24};$$

$$\begin{aligned} B_2 = & 2\lambda_1 A_{11} + 2\lambda_2 A_{12} + (\lambda_1 + \lambda_2) A_{13} + 3\lambda_1 A_{21} + \\ & + 3\lambda_2 A_{22} + (2\lambda_1 + \lambda_2) A_{23} + (\lambda_1 + 2\lambda_2) A_{24}. \end{aligned}$$

Если ограничится только первым приближением, то соотношение для определения  $i_H$  имеет вид:

$$i_H = K_0 (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) + \frac{R_A}{R_0} (C_{11} e^{\lambda_1 t} + C_{21} e^{\lambda_2 t} + i_{1H}). \quad (20)$$

### 3. АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ АППРОКСИМАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИМ ПОЛИНОМОМ

Если зависимость эквивалентного электрического сопротивления гранулированной среды от протекающего в ней тока описывать гиперболическим полиномом второй степени [1], то:

$$R_H = a_0 + \frac{a_1}{|i_H|} + \frac{a_2}{i_H^2}, \quad R_0 = a_0, \quad R_* = \frac{a_1}{i_H} + \frac{a_2}{i_H^2}. \quad (21)$$

В этом случае напряжение на нелинейной составляющей нагрузки будет описываться выражением  $i_H R_* = a_1 + a_2 / i_H$ , а его первая и вторая производные соответственно:

$$\frac{d(i_H R_*)}{dt} = \frac{-a_2}{i_H^2} \cdot \frac{di_H}{dt} \quad \text{и} \quad \frac{d^2(i_H R_*)}{dt^2} = \frac{-a_2}{i_H^2} \cdot \frac{d^2 i_H}{dt^2} + \frac{2a_2}{i_H^3} \left( \frac{di_H}{dt} \right)^2.$$

Таким образом, уравнение, описывающее переходные процессы в рассматриваемой цепи, имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{R_A}{L} \frac{di_1}{dt} + \omega_0^2 i_1 + \frac{\omega_0^2 a_1}{R_0 + R_\phi} + \frac{R_A}{R_0} \times \\ & \times \left[ \frac{-a_2}{R_\phi i_1^2} \cdot \frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{2a_2}{R_\phi i_1^3} \left( \frac{di_1}{dt} \right)^2 - \frac{a_2}{i_1^2 L} \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{\omega_0^2 a_2}{R_\phi i_1} \right] = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Для решения уравнения (22) применим метод малого параметра [4], который определяется по (6) и будем искать  $i_H$  в виде (7). Тогда уравнение при  $\varepsilon^0$  принимает вид:

$$\frac{d^2 i_0}{dt^2} + \frac{R_A}{L} \cdot \frac{di_0}{dt} + \omega_0^2 i_0 = \frac{-\omega_0^2 a_1}{R_0 + R_{\text{ш}}}, \quad (23)$$

а порождающее решение:

$$i_0 = C_{10} e^{\lambda_1 t} + C_{20} e^{\lambda_2 t} - \frac{a_1}{R_0 + R_{\text{ш}}}. \quad (24)$$

В этом случае для нахождения постоянных интегрирования необходимо пользоваться не начальными условиями, которые в данном случае некорректны, а специальными условиями в точке достижения функцией  $i(t)$  максимального значения:

$$i_H = I_m \Big|_{t=t_m}; \quad \left. \frac{di_H}{dt} \right|_{t=t_m} = 0. \quad (25)$$

Тогда постоянные интегрирования определяются по формуле:

$$\begin{aligned} C_{10} &= K_0 \lambda_2 e^{-\lambda_1 t_m}; \\ C_{20} &= -K_0 \lambda_1 e^{-\lambda_2 t_m}. \end{aligned} \quad (26)$$

где  $K_0 = \frac{I_m (R_0 + R_{\text{ш}}) + a_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(R_0 + R_{\text{ш}})}$ .  $(27)$

Корни характеристического уравнения определяются согласно (10). Таким образом, порождающее решение:

$$i_0 = K_0 \left( \lambda_2 e^{\lambda_1(t-t_m)} - \lambda_1 e^{\lambda_2(t-t_m)} \right) - \frac{a_1}{(R_0 + R_{\text{ш}})}. \quad (28)$$

Уравнение при  $\varepsilon^1$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{R_A}{L} \frac{di_1}{dt} + \omega_0^2 i_1 &= \frac{a_2}{R_{\text{ш}} i_0^2} \cdot \frac{d^2 i_0}{dt^2} - \frac{2a_2}{R_{\text{ш}} i_0^3} \cdot \left( \frac{di_0}{dt} \right)^2 + \\ &+ \frac{a_2}{L i_0^2} \cdot \frac{di_0}{dt} - \frac{\omega_0^2 a_2}{R_{\text{ш}} i_0} = F_1(t). \end{aligned} \quad (29)$$

Для нахождения решения уравнения (29) воспользуемся методом изменения произвольных постоянных Лагранжа [5]. С этой целью представим решение в виде:

$$i_1 = \vartheta_1(t) e^{\lambda_1 t} + \vartheta_2(t) e^{\lambda_2 t}, \quad (30)$$

$$\vartheta_1(t) = - \int \frac{F_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} dt + C_{11}; \quad (31)$$

где

$$\vartheta_2(t) = \int \frac{F_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} dt + C_{21}.$$

Формула для определения  $i_H(t)$  с учетом только нулевого и первого приближений принимает вид:

$$\begin{aligned} i_H &= K_0 \left( \lambda_2 e^{\lambda_1(t-t_m)} - \lambda_1 e^{\lambda_2(t-t_m)} \right) - \\ &- \frac{a_1}{(R_0 + R_{\text{ш}})} + \frac{R_A}{R_0} \left( \vartheta_1(t) e^{\lambda_1 t} + \vartheta_2(t) e^{\lambda_2 t} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Как видно из приведенных расчетов, использование алгебраического полинома по сравнению с гиперболическим для аппроксимации зависимости эквивалентного электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока не имеет преимуществ ни при

решении дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в таких цепях, ни при анализе полученных результатов.

2. Поскольку приближение зависимости сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них тока гиперболическими полиномами характеризуются малой невязкой и большим диапазоном интерполяции, использование их является предпочтительным при анализе переходных процессов в цепях с такими нагрузками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захарченко С.Н. Моделирование зависимости электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока // Техническая электродинамика. – 2012. – № 5. – С. 17-27.
2. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопат'ко К.Г., Шевченко Н.И., Ломко Н.А. Разрядно-импульсные системы производства наноколлоидных растворов биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2010. – № 26. – С. 152-160.
3. Щерба А.А., Захарченко С.М., Супруновська Н.І., Шевченко Н.І., Монастирський Г.Є., Перетятою Ю.В., Петрученко О.В. Стабілізація режимів електротехнологічних систем для отримання іскроерозійних мікро- та нанопорошків // Техническая электродинамика. Тематичний выпуск Силова электроника та енергоефективность. – 2006. – Ч.1. – С. 120-123.
4. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Наука, 1974. – 504 с.
5. Смирнов В.И. Курс высшей математики, Т.2 – М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1953. – 628 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zaharchenko S.N. Modelirovanie zavisimosti elektricheskogo soprotivleniya granulirovanniy tokoprovodyschih sred ot protekayuscheho v nih impul'snogo toka // Tehnichna elektrodinamika. - 2012. - № 5. - S. 17-27. 2. Scherba A.A., Zaharchenko S.N., Lopat'ko K.G., Shevchenko N.I., Lomko N.A. Razryadno-impul'snye sistemy proizvodstva nanokolloidnyh rastvorov biologicheski aktivnyh metallov metodom ob'emnogo `elektroiskrovogo dispergirovaniya // Pr. In-tu elektrodinamiki NAN Ukrayini: Zb. nauk. pr. - Kyiv: IED NANU. - 2010. - № 26. - S. 152-160. 3. Scherba A.A., Zaharchenko S.M., Suprunovs'ka N.I., Shevchenko N.I., Monastir's'kyj G.Є., Peretyatko Yu.V., Petruchenko O.V. Stabilizaciya rezhimiv elektrotehnologichnih sistem dla otrimannya iskroerozijnih mikro- ta nanoporoshkiv // Tehnichna elektrodinamika. Tematichnjий vypusk Silova elektronika ta energoefektivnist'. - 2006. - Ch.1. - S. 120-123. 4. Bogolyubov N.N., Mitropol's'kij Yu.A. Asimptoticheskie metody v teorii nelinejnyh kolebanij. - M.: Nauka, 1974. - 504 s. 5. Smirnov V.I. Kurs vysshej matematiki, T.2 - M.: Gos. izd-vo tehniko-teoreticheskoy lit-ry, 1953. - 628 s.

Поступила 20.10.2012

Шидловская Наталья Анатольевна, чл.-корр. НАН Украины  
Захарченко Сергей Николаевич, к.т.н.

Институт электродинамики НАН Украины

03680, Киев, пр. Победы, 56

тел. (044) 4542425, 4542494

e-mail: shydlovska@ied.org.ua,snzakhar@bk.ru

Shydlovska N.A., Zakharchenko S.N.

**Comparative analysis of algebraic and hyperbolic polynomials application in research on transients in output circuits of discharge-pulse systems.**

A comparative analysis of usability of algebraic and hyperbolic polynomials approximating current dependence of granulated current-carrying media resistance at calculation of transients in discharge-pulse system output circuits is carried out.

**Key words – nonlinear resistance, approximation, transient process.**

## ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРОВ НИЗКИХ ЧАСТОТ

*Сучасні високовольтні системи діагностики об'єктів емкостного типу за характеристиками часткових розрядів – складні комплекси з маслонаповненим обладнанням. Часткові розряди (ЧР) з уявною амплітудою 1000 пКл вважаються для них допустимими. Керований реактор традиційного виконання з ізоляцією класу 110 кВ неможливо безпосередньо підключити до силового кабелю зі шитою ізоляцією, який випробовується, адже рівень ЧР в ньому не повинен перевищувати 2 пКл. З використанням високовольтного фільтру низьких частот виконується подавлення можливої імпульсної завади. В статті наводяться результати розрахунку частотних характеристик високовольтного фільтру в області частот спектру сигналів ЧР.*

*Современные высоковольтные системы диагностики объектов емкостного типа по характеристикам частичных разрядов представляют собой сложные комплексы, содержащие маслонаполненное оборудование. Частичные разряды (ЧР) с кажущейся амплитудой 1000 пКл считаются для них вполне допустимыми. Управляемый реактор традиционного исполнения с изоляцией класса 110 кВ нельзя непосредственно подключить к испытуемому силовому кабелю со шитой изоляцией, нормируемый уровень ЧР которого не должен превышать 2 пКл. Подавление возможной импульсной помехи выполняется с использованием высоковольтного фильтра низких частот. В статье приводятся результаты расчета частотных характеристик высоковольтного фильтра в области частот спектра сигналов ЧР.*

### ВВЕДЕНИЕ

Современные высоковольтные системы диагностики для контроля отсутствия частичных разрядов (ЧР) в кабелях с полимерной изоляцией выполнены по последовательной резонансной схеме, в которой наиболее сложным и дорогим устройством является управляемый реактор [1-4].

В качестве основного варианта силовой части установки выбрана схема с компенсирующим трансформатором и регулируемым реактором, включенным последовательно с объектом испытаний [3]. При высокой добротности емкостного объекта испытаний и соответствующей высокой добротности цепи регулируемого реактора (включая вторичную обмотку компенсирующего трансформатора и индуктивность фильтра низких частот) такая схема позволяет получить существенный выигрыш по суммарной мощности, потребляемой от сети. В момент резонанса мощность компенсирующего трансформатора расходуется только на покрытие тепловых потерь в колебательном контуре. При нештатной ситуации (в случае пробоя объекта испытаний или перекрытия по поверхности муфты) схема выходит из резонанса и ток резко снижается.

Однако управляемые реакторы для компенсации реактивной мощности, трансформаторы возбуждения, изолирующие трансформаторы являются высоковольтным маслонаполненным оборудованием. Традиционные нормы выполнения внешней и внутренней изоляции, принятые практикой конструирования и эксплуатации трансформаторов и реакторов, таковы, что частичные разряды с кажущейся амплитудой около 1000 пКл считаются вполне допустимыми для маслонаполненного высоковольтного оборудования (рис. 1). Нормированные значения амплитуды кажущегося заряда при испытании измерительных и силовых трансформаторов, реакторов, опорных изоляторов и вводов должны находиться в интервале от 10 до 300 пКл [5-6].

На приведенной зависимости амплитуды кажущихся зарядов в изоляции трех фаз автотрансформатора 110/220 кВ от коэффициента регуляриности ЧР,

представляющем отношение числа периодов, в которых возникают ЧР определенной амплитуды кажущихся зарядов, к общему числу периодов измерения ЧР, видно, что в изоляции возможно превышение нормируемых значений в 100 раз [5]. Поэтому реактор традиционного исполнения с изоляцией класса 110 кВ нельзя непосредственно подключить к испытуемому кабелю, нормируемый уровень ЧР которого не должен превышать 5 пКл (таблица 1) [7].

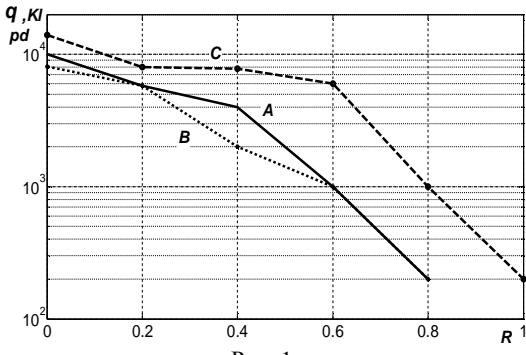


Рис. 1

Таблица 1  
Технические требования к кабелям высокого и сверхвысокого напряжения с изоляцией на основе шитого полиэтилена.

Вид испытаний	Нормы заводских испытаний		
	Напряжение измерения ( $U_o$ – рабочее напряжение)		
Напряжение измерения ( $U_o$ – рабочее напряжение)			
ЧР, сплошной контролль	$1,5 \cdot U_o$ $< 5$ пКл	$1,5 \cdot U_o$ $< 5$ пКл	$1,5 \cdot U_o$ $< 10$ пКл
Испытание напряжением, сплошной контролль	$2,5 \cdot U_o$ 30 мин	$2,5 \cdot U_o$ 30 мин	$(2-2,5) \cdot U_o$ (30 - 60) мин

Для уменьшения влияния помех, возникающих в управляемом реакторе при развитии в изоляции собственных частичных разрядов, между реактором и объектом контроля необходимо обязательно устанавливать **высоковольтный фильтр низких частот (ВВФНЧ)**. Фильтр должен пропускать гармонику испытательного напряжения, но не пропускать помехи, возникающие в управляемом реакторе.

тельного напряжения частоты 50 Гц и ослаблять все высокочастотные гармоники, возникающие в реакторе за счет коронирования отдельных элементов его внутренней и внешней изоляции, а также за счет искажений кривой тока вследствие нелинейных свойств ферромагнитного сердечника.

**Цель статьи** – повышение чувствительности систем диагностики твердой изоляции по характеристикам частичных разрядов с использованием высоковольтных фильтров низкой частоты.

#### Рекомендации по выбору и расчету ВВ ФНЧ

Разные фирмы – производители высоковольтных установок для испытаний силовых кабелей в качестве ВВ ФНЧ используют реактивные фильтры на основе емкостей и индуктивностей. Так, фирмой High Volt для этой цели использован П-образный С-Л-С фильтр третьего порядка, фирмой Hipotronics – фильтр пятого порядка. По-видимому, реактор фирмы Hipotronics отличается более высоким уровнем собственных ЧР, раз для него понадобился фильтр более высокого порядка. Реактор фирмы Siemens имеет более низкий собственный уровень ЧР, поскольку для ВВ ФНЧ понадобился всего простой LCL- фильтр.

На рис. 2 приведена принципиальная схема основной силовой части установки и измерительной цепи системы диагностики: T1 – регулятор напряжения однофазный (РНО); T2 – трансформатор, компенсирующий потери энергии в последовательном колебательном контуре, образованном емкостью C3 объекта испытаний и индуктивностью L1 реактора; R1 – эквивалентное активное сопротивление реактора (с учетом потерь в магнитопроводе), C1, C0 – емкостной делитель напряжения; L2, R2 – параметры индуктивности высоковольтного фильтра, уменьшающего сигнал помехи (A) от коронирующей высоковольтной части реактора; R3 – эквивалентное сопротивление потерь в объекте испытаний и соединительных муфтах; Z4 – измерительный импеданс.

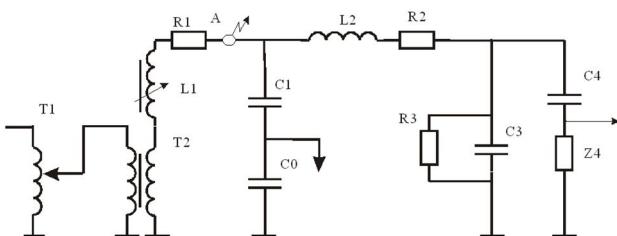


Рис. 2

Однофазные регуляторы напряжения (типа РНО), выполненные по автотрансформаторной схеме со скользящим контактом, также могут быть причиной возникновения искрения при регулировании напряжения.

В высоковольтном фильтре низкой частоты величины емкости и индуктивности могут варьироваться в достаточно широких пределах. При этом обеспечивается подавление возможной импульсной помехи на входе фильтра с зарядом до 1000 пКл при одновременном прохождении на измерительное сопротивление полезного сигнала от заряда величиной 2 пКл. Величина амплитуды кажущегося заряда в 2 пКл принята в качестве нормируемой при испытаниях высоковольтных силовых

кабелей напряжением 110 и 220 кВ со сшитой полиэтиленовой изоляцией ПАТ "Южкабель" [8].

Фильтрация сигнала помехи осуществляется С-Л-С фильтром, образованным высоковольтной емкостью C1, индуктивностью L2 и емкостью C3 самого объекта испытаний

Надо отметить, что как со стороны источника сигнала помехи - со стороны реактора, так и со стороны нагрузки фильтра – объекта испытаний и измерительной цепочки – фильтр нагружен на несогласованные частотно-зависимые сопротивления. Поэтому стандартные формулы для расчета полосы пропускания фильтров, нагруженных на согласованные сопротивления, в данном случае не применимы.

Емкость объекта испытаний – бухты кабеля – также можно считать элементом низкочастотного фильтра, учитывая, что собственная индуктивность цепи с кабелем – мала. Для этого кабель должен подключаться "бифилярно" – т.е. так, чтобы цепи прямого и обратного токов пролегали наиболее близко друг от друга. Жила испытуемого кабеля подключается к источнику высокого напряжения, а экран – с этого же края – к заземлению. Аналогично подключается и второй конец кабеля. Подключение кабеля к установке одновременно с двух концов повышает чувствительность измерений ЧР, ведь сигнал последнего сильно затухает при движении по кабелю к соединительной муфте. Недопустимо подключение, при котором емкостной ток кабеля протекает по бухте только в одном направлении, т.е. когда жила подключается с одного края кабеля, а экран – с другого.

Расчет частотных характеристик силовых цепей в области частот до 1 МГц (область спектра сигналов ЧР) связан с проблемами учета паразитных индуктивностей и паразитных емкостей. Поскольку эти величины обычно не нормируются, то точность подобных расчетов может быть относительно невысокой. Поэтому характеристики фильтра следует проектировать с определенным запасом. При этом следует учитывать, например, что чем выше емкость элемента фильтра, тем больше будет ее паразитная индуктивность. Для фильтров требуются малоиндуктивные конденсаторы. Аналогичные предостережения касаются и индуктивностей ВВ ФНЧ: чем больше индуктивность, тем выше ее паразитная емкость. Последняя может свести на нет весь эффект фильтрации высокочастотного сигнала фильтром низких частот.

Для уменьшения паразитных индуктивностей емкостных элементов часто используют параллельное соединение двух емкостей: одна – малоиндуктивная – сравнительно небольшой величины, другая – обычная с требуемой емкостью. Такая комбинация, применяемая в низковольтной технике, не всегда применима на высоком напряжении, так как высоковольтные емкости представляют собой сложные конструктивные элементы.

Для уменьшения паразитных емкостей индуктивных элементов каркасы индуктивностей ВВ ФНЧ следует выполнять из неполярного диэлектрика, а намотку вести с принудительным шагом. Увеличение расстояния между витками приводит к снижению межвитковой емкости.

## Анализ результатов расчета ВВ ФНЧ

Представим упрощенную схему резонансной установки в виде последовательно включенного источника ЭДС, индуктивности реактора с потерями, емкости кабеля (рис. 3). Между источником ЭДС и кабелем включен L, С фильтр низких частот.

Зададимся параметрами фильтра по аналогии с известными прототипами [9]. Выполним расчет прохождения через фильтр калибровочного сигнала, который имитирует сигнал помехи.

Для этого источник импульсной ЭДС  $E_g$  подключим ко входу ВВ ФНЧ через небольшую емкость  $C_g = 100 \text{ пФ}$ . Тогда в цепь вводится калибровочный заряд величиной

$$Q_g = E_g \cdot C_g.$$

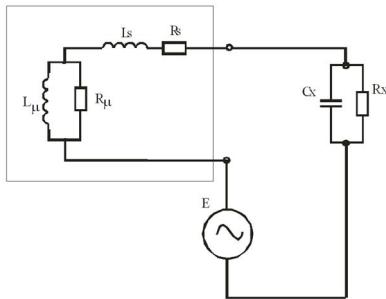


Рис. 3

При калибровочном сигнале помехи в  $1000 \text{ пКл}$  ЭДС генератора помехи составляет  $10 \text{ В}$ .

Рассчитаем отклик на измерительном сопротивлении  $Z_4$  от полезного сигнала, который имитируем, подключая генератор  $E_g$  непосредственно к измерительной цепочке.

**Уровень информационного калибровочного сигнала выберем равным  $2 \text{ пКл}$ , т.е. ЭДС генератора полезного сигнала равна  $20 \text{ мВ}$ .**

Качество фильтрации будем считать удовлетворительным, если соотношение сигнал/помеха будет значительно выше 1.

На рис. 3 показана форма калибровочного сигнала треугольной формы, вводимого в начало ВВ ФНЧ и используемого для имитации помехи амплитудой  $10 \text{ В}$  длительностью  $0,5 \text{ мкс}$ . Сигнал смещен на  $1 \text{ мкс}$  по отношению к моменту начала отсчета. Период следования калибровочного сигнала равен  $5 \text{ мкс}$ .

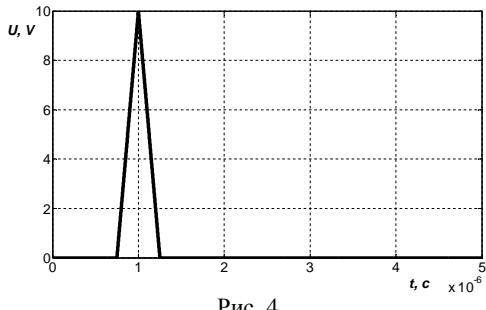


Рис. 4

Амплитудный и фазовый спектры калибровочного сигнала приведены на рис. 5 и рис. 6 соответственно. По горизонтали – номер  $k$ -й гармоники, по вертикали – амплитуда  $k$ -й гармоники для сигнала, приве-

денного на рис. 4. Частота первой гармоники равна  $200 \text{ кГц}$  при длительности сигнала  $5 \text{ мкс}$ . Для фазового спектра калибровочного сигнала: по горизонтали – номер гармоники, по вертикали – ее начальная фаза.

Как видно из рис. 5., энергия данного калибровочного сигнала сосредоточена, в основном, в первых 20 гармониках: в полосе частот от  $200 \text{ кГц}$  до  $4 \text{ МГц}$ .

Искажения фазовых спектров сигналов помех при прохождении их через ВВ ФНЧ несущественны для оценки помехоподавляющих свойств фильтра.

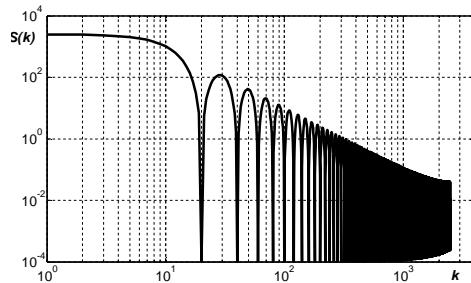


Рис. 5

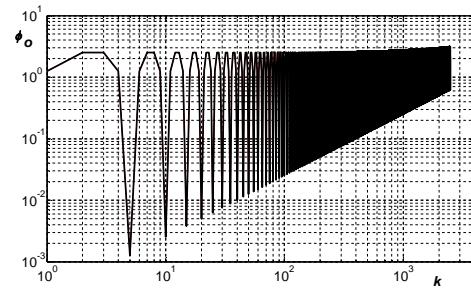


Рис. 6

Фазовая характеристика идеальной линии связи (без потерь электромагнитной энергии) – прямая линия: фазовые сдвиги должны быть пропорциональны номеру гармоники, чтобы соотношение между начальными фазами гармоник сохранилось неизменным.

Как видно из рис. 6, фазовый спектр сигнала – неубывающая функция частоты, в отличие от амплитудного спектра рис. 5. Любой ВВ ФНЧ вызовет сильные фазовые искажения зондирующего сигнала, из-за чего его форма на выходе фильтра может сильно отличаться от исходной.

На рис. 7 в логарифмическом масштабе по вертикали приведены сигналы на измерительном импедансе  $Z_4$  от действия импульса помехи (2) и полезного сигнала (1). Из-за этого они мало похожи по форме на зондирующий сигнал, приведенный в равномерном масштабе по вертикали на рис. 4.

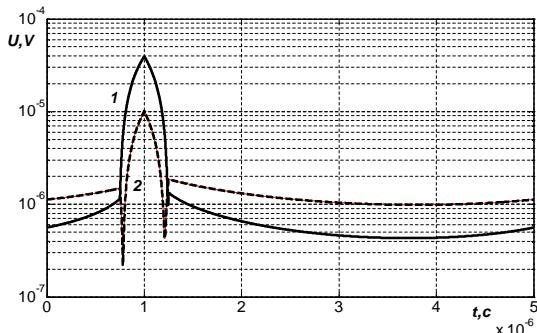


Рис. 7

Как видно из рис. 7, уровень полезного сигнала превышает уровень помехи в 4 раза. Следовательно, рассмотренный ВВ ФНЧ удовлетворяет поставленной задаче, т.е. обеспечивает фильтрацию помехи от работающего высоковольтного оборудования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка защитных свойств ФНЧ с учетом действия несогласованных нагрузок на входе и на выходе его проводится путем имитации реальных процессов калибровки. При этом погрешности расчетов, которые могут проявляться из-за высокого порядка реактивности рассматриваемых схем (в данном расчете число реактивных элементов равно 5), компенсируются: рассматривается не абсолютный уровень выходного сигнала, а по отношению к аналогичному сигналу (рис. 7), но поданному в другую точку схемы.

Таким образом, высоковольтный фильтр низких частот в системе диагностики твердой изоляции по характеристикам частичных разрядов должен иметь уровень собственных ЧР – не более 2 пКл, ослабление – не менее 40 дБ в диапазоне частот от 15 до 500 кГц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гурин А.Г., Беспрозванных А.В., Набока Г.Б., **Набока Б.Г.**. Воздушение резонансных колебаний в бухтах кабелей для оценки состояния изоляции // Сборник научных трудов ХГПУ "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". – Харьков: ХГПУ. – 2001.
- Набока Б.Г.**, Нечаус А.А., Лактионов С.В. Оценка уровня частичных разрядов в системе емкостей трехфазного трансформатора // Вісник НТУ "ХПІ". – 2003. – № 9. – Т.2. – С. 124-129.
- Резонансний пристрій контролю часткових розрядів. Деклараційний патент України № у 2007 11370 від 15.10.2007 / **Набока Б.Г.**, Гурин А.Г., Кононов Б.Т., Нечаус А.А., Лактионов С.В.
- Набока Б.Г.**, Гурин А.Г., Лактионов С.В., Золотарев В.М., Нечаус А.А. Обоснование допустимых режимов эксплуатации резонансных установок для диагностики кабелей. // Вісник НТУ "ХПІ". – 2005. – № 42. – С. 86-93.
- Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск, "Наука". – 2008. – 150 с.
- Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
- Мещанов Г.И., Кабели на напряжение 10-500 кВ: состояние и перспективы развития (анализ, прогноз, исследования) / Шувалов М.Ю., Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л. // Кабели и провода. – № 5 (312). – 2008.
- Силовые кабели среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена / Каталог. Закрытое акционерное общество "Завод Южкабель".
- Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. – М.: Мир, 1990. – 256 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gurin A.G., Besprozvannyh A.V., Naboka G.B., Naboka B.G. Vozbuzhdenie rezonansnyh kolebanij v buhtaah kabelej dlya ocenki sostoyaniya izolyacii // Sbornik nauchnyh trudov HGPU "Informacionnye tehnologii: nauka, tekhnika, tehnologiya, obrazovanie, zdorov'e". - Harkov: HGPU. - 2001. 2. Naboka B.G., Nechaus A.A., Laktionov S.V. Ocenka urovnya chasticchnyh razryadov v sisteme emkostej trehfaznogo transformatora // Visnik NTU "HPI". - 2003. - № 9. - T.2. - S. 124-129. 3. Rezonansnyj pristrij kontrolju chastkovih razryadiv. Deklaracijnyj patent Ukrainsi № u 2007 11370 vid 15.10.2007 / Naboka B.G., Gurin A.G., Kononov B.T., Nechaus A.A., Laktionov S.V. 4. Naboka B.G., Gurin A.G., Laktionov S.V., Zolotarev V.M., Nechaus A.A. Obosnovanie dopustimyh rezhimov ekspluatacii rezonansnyh ustanonok dlya diagnostiki kabelej.// Visnik NTU "HPI". - 2005. - № 42. - S. 86-93. 5. Vdoviko V.P. Chasticchnye razryady v diagnostrovaniy vysokovol'tnogo oborudovaniya. - Novosibirsk, "Nauka". - 2008. - 150 s. 6. Ob'em i normy ispytanij elektrooborudovaniya / Pod obsch. red. B.A. Alekseeva, F.L. Kogana, L.G. Mamikonyanca. - 6-e izd., s izm. i dop. - M.: Izd-vo NC 'ENAS, 2004. 7. Meschanov G.I., Kabeli na napryazhenie 10-500 kV: sostoyanie i perspektivy razvitiya (analiz, prognoz, issledovaniya) / Shuvalov M.Yu., Kamenskij M.K., Obrazcov Yu.V., Ovsienko V.L. // Kabeli i provoda. - № 5 (312). - 2008. 8. Silovye kabeli srednego i vysokogo napryazhenija s izolyacijei z izolyaciej z sshitogo poli'etilena / Katalog. Zakrytoe akcionernoe obshchestvo "Zavod Yuzhkabel". 9. Red 'E. Spravochnoe posobie po vysokochastotnoj shemotehnike. - M.: Mir, 1990. - 256 c.

Поступила 25.09.2012

*Безпрозванных Ганна Вікторова, д.т.н., проф.,  
Лактионов С.В.  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"  
кафедра електроізоляційної та кабельної техніки  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 70-76-10, e-mail:bezprozvannych@kpi.kharkov.ua*

*Bezprozvannych A.V., Laktionov S.V.*

**Sensitivity enhancement of a high-voltage power cables partial-discharge-characteristics-based diagnostics system by means of low-pass filters.**

Modern high-voltage systems of capacitive objects diagnostics through partial discharge characteristics are sophisticated complexes containing oil-filled equipment. For them, partial discharges (PD) with apparent amplitude of 1000 pC are considered quite admissible. A controlled conventional-configuration reactor with 110 kV-class insulation cannot be directly connected to a tested power cable with cross-linked insulation and rated PD level not exceeding 2 pC. Suppression of probable pulse noise is carried out by means of a high-voltage low-pass filter application. In the article, results of a high-voltage filter frequency characteristics calculation in the frequency range of the PD signal spectrum are presented.

**Key words – controlled reactor, partial discharges, power cable with the cross-linked insulation, high-voltage low-pass filter, signal spectrum.**

## КОМПАКТНЫЙ ЁМКОСТНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ НА 70 КВ С ЭКРАНИРОВАННЫМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

*На основі сформульованих принципів створено, успішно випробувано і введено в експлуатацію компактний ємнісний дільник напруги з коефіцієнтом ділення  $K_{\text{ЕДН}}=7653$ . Дільник розраховано на роботу з напругами різної форми при амплітуді до 70 кВ. Він має час наростання переходної характеристики не більше 1,5 нс. Діаметр дільника – 200 мм, довжина – 175 мм, маса – 1,27 кг.*

*На основе сформулированных принципов создан, успешно испытан и введен в эксплуатацию компактный ёмкостный делитель напряжения с коэффициентом деления  $K_{\text{ЕДН}}=7653$ . Делитель рассчитан на работу с напряжениями различной формы при амплитуде до 70 кВ, имеет время нарастания переходной характеристики не более 1,5 нс. Диаметр делителя – 200 мм, длина – 175 мм, масса – 1,27 кг.*

### ВВЕДЕНИЕ

Ёмкостные делители напряжения широко используются в технике сильных электрических и магнитных полей, технике и электрофизике высоких напряжений, экспериментальных исследованиях, технологиях.

Известны ёмкостные делители напряжений (ЕДН) для высоковольтных измерений [1-6]. Основные требования к ёмкостным делителям напряжения, использующимся в повседневной практике измерений высоковольтных импульсов: большой (более 5000) и стабильный (слабо зависящий от окружающей обстановки) коэффициент деления  $K_{\text{ЕДН}}$ , короткая переходная характеристика, достаточная компактность для данного уровня рабочих напряжений, малая масса и удобство в использовании.

Цель данной работы – создать компактный ёмкостный делитель напряжения для рабочих измерений напряжения амплитудой до 70 кВ.

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ КОМПАКТНОГО МАЛОИНДУКТИВНОГО ЁМКОСТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Согласно теории делителей напряжения (см., например, [2]) схема замещения ёмкостного делителя напряжения с сосредоточенными параметрами с учётом основных элементов собственно делителя имеет вид, представленный на рис. 1. Однако, ёмкостные делители напряжения на напряжение, по крайней мере, до 70 кВ могут быть выполнены малоиндуктивными, безрезистивными и компактными. На напряжениях, превышающих 70 кВ, может начать сказываться влияние короны. Действительно, если ёмкость высоковольтного плача ЕДН выполнить в виде одного простого (плоского или цилиндрического) воздушного конденсатора, а ёмкость низковольтного плача выполнить аналогично ёмкости высоковольтного плача, но гораздо меньшими расстояниями между обкладками, между которыми поместить тонкий плёночный диэлектрик, то индуктивности электродов – обкладок такого делителя малы (наибольшая индуктивность, с учётом направления протекания токов, – у высоковольтного электрода; её можно оценить в  $\sim 100$  нГн), а активным сопротивлением электродов можно пренебречь. Расстояние  $d$  между высоковольтным и промежуточным электродом ЕДН должно удовлетворять неравенству  $d \geq U/E_{\text{доп}}$ , где  $U$  – максимальное рабочее входное напряжение,  $E_{\text{доп}}$  – допустимая рабочая напряжённость электрического поля. Если принять  $U=70$  кВ,  $E_{\text{доп}}=1$  кВ/мм, то следует выбирать  $d$ , исходя из неравенства  $d \geq 70$  мм. Расстояние  $d$  определяет габариты ЕДН.

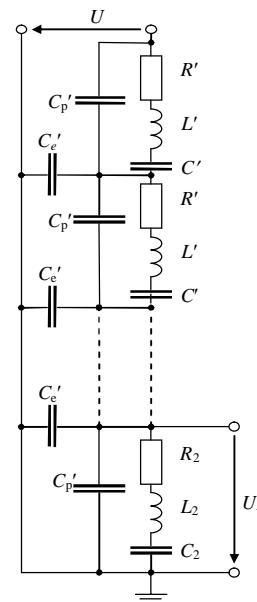


Рис. 1. Схема замещения ёмкостного делителя напряжения без учета измерительной цепи в плаче низкого напряжения:  
 $U$  – напряжение на входе ЕДН;  $U_2$  – напряжение на выходе ЕДН;  
 $C'$  – ёмкость одного из  $n$  конденсаторов высоковольтного плача ЕДН, включённых последовательно;  $L'$ ,  $R'$  – соответственно собственная индуктивность и активное сопротивление одного из  $n$  конденсаторов высоковольтного плача ЕДН;  $C_2$  – ёмкость низковольтного плача ЕДН;  $L_2$ ,  $R_2$  – соответственно собственная индуктивность и активное сопротивление ёмкости  $C_2$ ;  $C_p'$  – продольная паразитная ёмкость элементов ЕДН ( $C'$  и  $C_2$ );  $C_e'$  – ёмкость участков делителя (ЕДН), однородно распределённая относительно земли

Уменьшения габаритов делителя и увеличения предела допустимых рабочих напряжений ЕДН можно достичь, если высоковольтный электрод охватить, диэлектрическим барьером из электрически прочного твёрдого диэлектрика. Таким образом, электрическая схема компактного ЕДН может быть представлена в виде однозвездного высоковольтного плача и без учета активных сопротивлений плач делителя.

Такая схема представлена на рис. 2. В схеме на рис. 2 показана также измерительная цепь, состоящая из измерительного широкополосного коаксиального кабеля с волновым сопротивлением  $\rho_k=50$  Ом, согласованного со стороны низковольтного плача согласующим активным сопротивлением  $R_c=50$  Ом, и регистрирующего осциллографа  $N$  с входным напряжением  $U_N(t)$ . Согласующее активное сопротивление  $R_c$  для защиты от помех поме-

щено в защитный кожух К (на рис. 2 заштрихован), в который встроен широкополосный коаксиальный разъём для подключения к измерительному кабелю. Кожух К накоротко соединен с низковольтным электродом делителя. Со стороны низковольтного плеча делителя измерительная цепь в общем случае имеет сосредоточенную паразитную индуктивность  $L_n$ , величину которой следует минимизировать. Приемлемой может считаться  $L_n \leq 10^{-8}$  Гн при  $\rho_k = 50$  Ом.

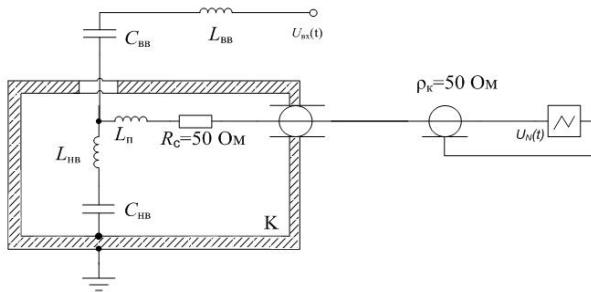


Рис. 2. Схема замещения компактного малоиндуктивного ёмкостного делителя напряжения:  $C_{\text{BB}}$ ,  $L_{\text{BB}}$  – ёмкость и индуктивность высоковольтного плеча соответственно;  $C_{\text{NB}}$ ,  $L_{\text{NB}}$  – ёмкость и индуктивность низковольтного плеча соответственно;  $U_{\text{BX}}(t)$  – входное напряжение делителя как функция времени  $t$

Влиянием измерительного кабеля на характеристики делителя можно пренебречь, если он (кабель) достаточно короткий [1, 2]. В случае достаточно короткого измерительного кабеля отпадает необходимость в дополнительной цепочке, содержащей дополнительную ёмкость и корректирующей коэффициент деления ЕДН так, чтобы он был практически одинаковым на высоких и на низких частотах. Коэффициент деления ЕДН без учета ёмкости измерительного кабеля, но с учетом влияния измерительной цепи в целом при высокомомном входе осциллографа  $N$  (см. рис. 2) равен

$$K_{\text{EDN}} = (C_{\text{BB}} + C_{\text{NB}})/C_{\text{BB}} \quad (1)$$

То же, но при низкомомном входе осциллографа  $N$ , согласованном с волновым сопротивлением кабеля  $\rho_k = 50$  Ом

$$K_{\text{EDN}} = 2(C_{\text{BB}} + C_{\text{NB}})/C_{\text{BB}}. \quad (2)$$

Формула (2) справедлива как для высоких частот, так и для низких частот. На высоких частотах дополнительное деление напряжения в два раза (на два) происходит между согласующим сопротивлением и волновым сопротивлением на входе кабеля, согласованного на выходе входным сопротивлением осциллографа без отражений. На низких частотах, когда волновые процессы практически окончились, дополнительное деление напряжение вдвое происходит между согласующим сопротивлением и равным ему входным сопротивлением осциллографа.

Если учитывать ёмкость измерительного кабеля  $C_k$ , то на низких частотах при осциллографе с высокомомном (примерно 1 МОм) входом, коэффициент деления отличается от такового по (1) и определяется при помощи формулы [2]

$$K_{\text{EDN}} = (C_{\text{BB}} + C_{\text{NB}} + C_k)/C_{\text{BB}}. \quad (3)$$

Чем меньше  $C_k$ , тем меньше отличие (3) от (1). Для высоковольтной практики отличие  $K_{\text{EDN}}$  для случая высоких и низких частот можно считать малым, если

$$C_k \leq 0,1 \cdot C_{\text{NB}}. \quad (4)$$

При использовании осциллографа с низкомомным входом ёмкостный делитель напряжения работает с малой погрешностью в течение допустимого отрезка времени  $t_{\text{доп}}$ , пока этот вход не начнет шунтировать ёмкость низковольтного плеча ЕДН, то есть в течение

$$t_{\text{доп}} \leq 0,2 \cdot R_c \cdot C_{\text{NB}}. \quad (5)$$

Для ЕДН характерен колебательный режим работы, когда на его вход подаются сигналы, содержащие частоты, превышающие собственные частоты делителя. Собственные частоты плеч ЕДН:

$$\text{- высоковольтного плеча } f_{\text{BB}} = (0,5/\pi)(L_{\text{BB}} C_{\text{BB}})^{-0.5}, \quad (6)$$

$$\text{- низковольтного плеча } f_{\text{NB}} = (0,5/\pi)(L_{\text{NB}} C_{\text{NB}})^{-0.5}. \quad (7)$$

Время нарастания переходной  $T_a$  характеристики делителя можно оценить, исходя из соотношения [1]

$$T_a = 0,35/B, \quad (8)$$

где  $B$  – полоса пропускаемых частот.

Если в качестве  $B$  взять меньшую из частот собственных колебаний, полагая, что меньшие частоты делитель пропускает без искажений, то  $T_a = 0,35/f_{\text{NB}}$ , если  $f_{\text{NB}} \leq f_{\text{BB}}$  и  $T_a = 0,35/f_{\text{BB}}$ , если  $f_{\text{BB}} \leq f_{\text{NB}}$ .

В безрезистивных ёмкостных делителях напряжения проблема колебаний возникает, если в сигналах, поступающих на их вход время нарастания примерно равно или короче времени нарастания переходной характеристики этих делителей. В этом случае на выходе делителя возникают искажения делённого сигнала тем большие, чем короче время нарастания измеряемого сигнала, поступающего на вход делителя.

Ёмкость  $C_{\text{NB}}$  низковольтного плеча ЕДН можно рассчитать по известной формуле плоского конденсатора [7] и при плоском, и при коаксиальном исполнении низковольтного плеча, поскольку из-за малости расстояния между промежуточным и низковольтным электродами по сравнению с радиусами этих электродов при их коаксиальном исполнении она (формула) верна и в этом случае:

$$C_{\text{NB}} = K_c \varepsilon \varepsilon_0 S / d_{\text{NB}}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \Phi/\text{м}$ ,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества в промежутке между промежуточным и низковольтным электродами,  $S$  – площадь поверхности тонкого кольцевого промежуточного электрода с одной стороны (или внутренней, или внешней),  $d_{\text{NB}}$  – величина промежутка между промежуточным и низковольтным электродом,  $K_c$  – коэффициент,  $1 \leq K_c \leq 2$ .

Коэффициент  $1 \leq K_c \leq 2$  в (9) имеет место, поскольку в образовании ёмкости между промежуточным и низковольтным электродом участвует вся площадь  $S$  наружной поверхности промежуточного электрода и часть площади внутренней поверхности промежуточного электрода. В образовании этой ёмкости может участвовать не только внешняя, но и внутренняя поверхность промежуточного электрода вследствие возможного охвата промежуточного электрода низковольтным электродом таким образом, что между краями низковольтного электрода остается щель для образования ёмкости между высоковольтным и промежуточным электродом ЕДН.

Ёмкость  $C_{\text{BB}}$  высоковольтного плеча ЕДН можно оценить по формуле (10) [8], приведенной ниже и определяющей ёмкость прямолинейного провода конечной длины, проходящего через центр кругового выреза в проводящей плоскости перпендикулярно последней так, что его середина совпадает с центром отверстия:

$$C_{\text{BB}} \approx (2\pi \varepsilon_a l) / \ln[(2lR/a)/(2R+l)], \quad (10)$$

где  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между проводниками,  $l$  – длина прямолинейного проводника,  $R$  – радиус кругового выреза,  $a$  – радиус прямолинейного провода.

Формула (10) может быть использована для оценочного расчёта ёмкости прямолинейного провода конечной длины, расположенного над прямоугольной пластиной параллельно последней, а также ёмкости прямолинейного провода конечной длины, соосного с тонкостенной трубкой конечной длины, меньшей, чем длина провода.

Оценим  $L_{\text{вв}}$  из (6), используя данные [9] для расчёта индуктивности прямолинейного провода круглого сечения из материала с  $\mu=\mu_0$ :

- при постоянном токе и низкой частоте

$$L_{\text{вв}}=[\mu_0 l/(2\pi)] \cdot [\ln(2l/r) - 3/4], \quad (11)$$

где  $l$  – длина высоковольтного электрода ёмкостного делителя напряжения,  $r$  – радиус поперечного сечения этого электрода;

- при весьма высокой частоте

$$L_{\text{вв}}=[\mu_0 l/(2\pi)] \cdot [\ln(2l/r) - 1]. \quad (12)$$

Оценим погонную (на единицу длины) индуктивность  $L_{\text{ппв}}$  низковольтного плеча из (7), используя данные [9] для расчёта погонной индуктивности коаксиального кабеля с двумя полыми (трубчатыми) тонкими проводами

$$L_{\text{ппв}}=[\mu_0/(2\pi)] \cdot \ln(q/p), \quad (13)$$

где  $q$  – внутренний радиус внешнего трубчатого проводника,  $p$  – внешний радиус внутреннего трубчатого проводника, и тонких однофазных шин прямоугольного сечения

$$L_{\text{ппв}}=(\mu_0/\pi) \cdot [\ln(d/c) + (\gamma^2 - 1)/(2\gamma^2) \ln(1+\gamma^2) + (2/\gamma) \operatorname{arctg} \gamma], \quad (14)$$

где  $\gamma=c/d$ ,  $c$  – ширина шины,  $d$  – расстояние между шинами.

При  $(c/d) \rightarrow \infty$  (14) преобразуется в

$$L_{\text{ппв}}=(\mu_0/\pi) \cdot [\ln(d/c) + \ln(c/d) + (d/c)\pi] = (\mu_0/\pi) \cdot [\ln 1 + \pi(d/c)] = \mu_0 d/c. \quad (15)$$

При  $q=p+d_k$ , где  $d_k$  – расстояние между наружной поверхностью внутреннего проводника и внутренней поверхностью внешнего проводника в (13), и  $q/p=(p+d_k)/p=1+(d_k/p) \rightarrow 1$  со стороны больших 1 (единицы) значений (13) упрощается:

$$L_{\text{ппв}}=[\mu_0/(2\pi)] \cdot \ln(1+d_k/p) \approx [\mu_0/(2\pi)] \cdot d_k/p = \mu_0 d_k/(2\pi p). \quad (16)$$

Формулы (15) и (16), по сути, идентичны, однако следует учитывать возможность различных вариантов протекания токов по проводникам, что приводит к различным индуктивностям геометрически одинаковых систем проводников. Вследствие возможного охвата промежуточного электрода низковольтным электродом, как описано выше, индуктивность  $L_{\text{ппв}}$  уменьшается (аналогично увеличению ёмкости  $C_{\text{пп}}$ ), что учтём в (15) и (16) введением коэффициента  $0.5 \leq K_L \leq 1$ . Получим:

$$L_{\text{ппв}}=K_L \mu_0 d/c, \quad (17)$$

$$L_{\text{ппв}}=K_L \mu_0 d_k/(2\pi p). \quad (18)$$

Для получения большого и стабильного коэффициента деления  $K_{\text{ЕДН}}$  эффективным является использование при создании ЕДН идеи экранировки промежуточного электрода путём охвата его низковольтным электродом, изложенной в [5].

## УСТРОЙСТВО СОЗДАННОГО ДЕЛИТЕЛЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

Созданный ЕДН отличается тем, что при коаксиальном исполнении его высоковольтное плечо образовано центральным металлическим стержнем длиной

$\approx 175$  мм, диаметром  $2a=12$  мм (высоковольтный электрод) и трубчатым промежуточным электродом диаметром  $\approx 200$  мм. При этом промежуточный электрод охвачен низковольтным электродом, который образует с промежуточным ёмкость низковольтного плеча ЕДН так, как показано на рис. 3. Таким образом, низковольтный электрод экранирует промежуточный от воздействия внешних электрических полей. Это значит, что паразитная ёмкость  $C_n$ , которая может быть образована внешними по отношению к ЕДН предметами с промежуточным электродом 4 в ЕДН, удовлетворяет неравенству

$$C_n \ll C_{\text{вв}}, \quad (19)$$

где  $C_{\text{вв}} \sim 10^{-12} \Phi$ .

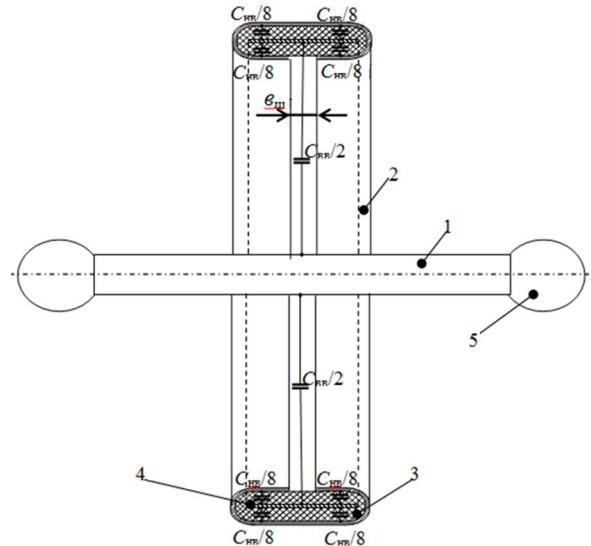


Рис. 3. Схема устройства ЕДН: 1 – высоковольтный электрод ЕДН; 2 – низковольтный электрод ЕДН; 3 – изоляция низковольтного плеча ЕДН; 4 – промежуточный кольцевой электрод ЕДН; 5 – антикоронная гайка для подключения высоковольтного провода;  $v_{\text{ш}}$  – ширина кольцевой щели в низковольтном электроде ЕДН

Соотношение (19) соблюдается благодаря тому, что промежуточный электрод охвачен и в высокой степени экранирован низковольтным электродом ЕДН, образуя ёмкость  $C_{\text{пп}}$  низковольтного плеча ЕДН ( $C_{\text{пп}} \approx (5 \div 50) \times 10^{-9} \Phi$ ). Поэтому помимо низковольтного электрода только высоковольтный электрод может образовать заметную ( $\sim 10^{-12} \Phi$ ) ёмкость с промежуточным электродом ЕДН. Подводящие провода и другие внешние предметы находятся от промежуточного электрода на существенно большем расстоянии, чем высоковольтный электрод, поэтому (19) соблюдается всегда.

Кольцевая щель в низковольтном электроде, охватывающем промежуточный электрод ЕДН, имеет ширину  $v_{\text{ш}} \approx 16$  мм (см. рис. 3). Коэффициент деления ЕДН, электрическая схема которого с регистрирующим осциллографом приведена на рис. 2., можно найти при помощи (1) либо при помощи

$$K_{\text{ЕДН}}=U_{\text{вх}}/U_{\text{N}}, \quad (20)$$

где  $U_{\text{N}}$  – напряжение на входе осциллографа,  $U_{\text{вх}}$  – напряжение на входе ЕДН.

Соотношение (20) верно при входном сопротивлении осциллографа  $R_{\text{вх},\text{N}} >> 50 \Omega$ . При  $R_{\text{вх},\text{N}}=50 \Omega$

$$K_{\text{ЕДН}}=U_{\text{вх}}/(2U_{\text{N}}), \quad (21)$$

если коэффициент деления  $K_{\text{ЕДН}}$  рассчитан при помощи (1).

Предварительно было осуществлено определение коэффициента деления ЕДН при помощи генератора стандартных импульсов Г5-54. Во всех, представленных в данной работе экспериментах в качестве регистрающего осциллографа использовался двухканальный цифровой осциллограф RIGOL DS1102E DIGITAL OSCILLOSCOPE с полосой пропускания 100 МГц.

Преимуществом такого определения было удобство использования промышленного генератора Г5-54, а недостатком – малая амплитуда выходных импульсов от этого генератора, поступающих на вход делителя. Это приводило к необходимости использования максимальной чувствительности осциллографа ( $5 \text{ mV/div}$ ), на которой становилось существенным влияние помех. Вследствие этого осциллограммы выходного сигнала с исследуемого ёмкостного делителя напряжения были существенно размытыми, что увеличивало погрешность измерений. Осциллограммы на входе ЕДН (в виде меандра, указанная стрелками 1) и на его выходе (размытая кривая, указанная стрелками 2) представлены на рис. 4.

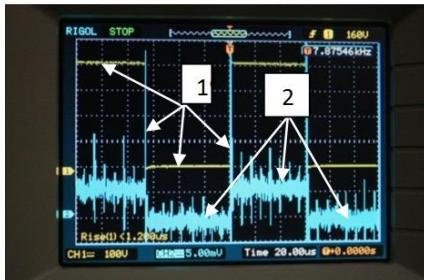


Рис. 4. Осциллограммы на входе и выходе созданного ёмкостного делителя напряжения, полученные при использовании в качестве источника входных сигналов генератора импульсов Г5-54

Амплитуда импульсов на выходе Г5-54 не превышает 60 В. Согласно осциллограмме (в виде меандра) на рис. 4 она составляет 40 В, поскольку при снятии этой осциллограммы в настройках осциллографа по этому каналу для внутреннего делителя напряжения был установлен множитель 10, а не 1. Поэтому при определении амплитуды сигнала – меандра на входе делителя, исходя из данных осциллограммы на рис. 4, высеченную чувствительность по оси процесса  $100 \text{ V/div}$  следует умножить на количество делений (*dividers*) по оси процесса и разделить на 10, откуда и получается 40 В. Амплитуда напряжения на выходе делителя при этом (см. "размытую" кривую на рис. 4) составляет примерно 5 мВ (на этом канале осциллографа, который показывает осциллограмму с выхода делителя, в настройках был установлен множитель 1). Таким образом, исходя из осциллограмм на рис. 4 коэффициент деления  $K_{\text{ЕДН}} \approx 40 \text{ В} / 0,005 \text{ В} = 8000$ .

Для уточнённого экспериментального определения коэффициента деления созданного компактного ЕДН и измерения его переходной характеристики была создана экспериментальная установка, электрическая схема которой приведена на рис. 5. В состав установки входит высоковольтный генератор на основе ёмкостного накопителя энергии, коммутатора в виде искрового разрядника тригатронного типа и резистивной нагрузки. Основные (главные) электроды тригатрона имеют форму, близкую к полусферической, а его управляющий электрод, встроенный в один из двух основных электродов, ни к чему не подключался. Таким образом, тригатрон использовался в

качестве двухэлектродного шарового разрядника с несколько уменьшенным пробивным напряжением. От зарядного устройства высоковольтный конденсатор типа ИМН 100/0,1 заряжался до напряжения  $U_{\text{пр}} = (6,2 \div 6,3) \text{ кВ}$ , контролируемого по киловольтметру типа С196. При напряжении  $U_{\text{пр}}$  срабатывал разрядник  $P$ , зазор между главными электродами которого был выставлен на это статическое пробивное напряжение. После срабатывания разрядника  $P$  напряжение от конденсатора прикладывалось к нагрузочному сопротивлению  $R_h = 1,3 \text{ кОм}$ , выполненному при помощи резистора ТВО 60, и индуктивности  $L \approx 1 \text{ мГн}$  разрядного контура установки. Параллельно нагрузочному сопротивлению было подключено вход ЕДН, поэтому амплитуда напряжения  $U_{\text{авх}}$  на входе делителя после срабатывания разрядника  $P$  составляла  $U_{\text{авх}} \approx U_{\text{пр}}$  с погрешностью, не превышающей суммарную погрешность, вносимую киловольтметром и визуальным отсчетом по шкале киловольтметра. Сигнал  $U_{\text{пп}}$  с низковольтного плеча ЕДН через согласующее сопротивление и измерительный широкополосный коаксиальный кабель поступал на вход осциллографа с входным сопротивлением 1 МОм, где и регистрировался в виде осциллограмм  $U_N$ . Экспериментально по осциллограммам определялось напряжение  $U_{\text{пп}} \approx U_N$  на низковольтном плече ЕДН, в том числе его амплитуда  $U_{\text{пп}}$ , и коэффициент деления  $K_{\text{ЕДН}} = U_{\text{авх}} / U_{\text{пп}}$ .

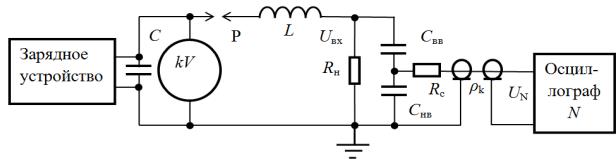


Рис. 5. Электрическая схема экспериментальной установки:  
 $L \sim 1 \text{ мГн}$  – индуктивность разрядного контура установки;  
 $C = 0,1 \text{ мКФ}$  – ёмкость высоковольтного ёмкостного накопителя (конденсатор ИМН-100/0,1);  $P$  – искровой разрядник тригатронного типа со скругленными основными электродами, управляющий электрод которого не задействован;  $R_h$  – сопротивление нагрузки, выполненное резисторами ТВО-60,  $R_h = 1,3 \text{ кОм}$ ;  $\rho_k$  – волновое сопротивление измерительного широкополосного коаксиального кабеля,  $\rho_k = 50 \text{ Ом}$ ;  $R_c$  – согласующее сопротивление,  $R_c \approx 50 \text{ Ом}$ ;  $C_{\text{вв}}$ ,  $C_{\text{пп}}$  – ёмкости высоковольтного и низковольтного плеч ёмкостного делителя напряжения;  $kV$  – киловольтметр (С196)

Эскиз созданного ёмкостного делителя напряжения приведен на рис. 6, а фото – на рис. 7. Щель шириной  $\vartheta_{\text{ш}}$  (см. рис. 3) в низковольтном электроде, охватывающем промежуточный электрод в ЕДН, и подробная конструкция низковольтного узла ЕДН на рис. 6 не показаны.

Измеренная масса  $M_{\text{ЕДН}}$  созданного компактного ёмкостного делителя напряжения на 70 кВ (см. рис. 3, 6, 7) без измерительного кабеля составила  $M_{\text{ЕДН}} = (1,268 \pm 0,001) \text{ кг}$ .

Осциллограммы, позволяющие судить о величине коэффициента деления ЕДН, времени нарастания переходной характеристики созданного ЕДН и форме напряжения на резистивной нагрузке в схеме на рис. 5, представлены на рис. 8-9. Согласно этим осциллограммам и показаниям киловольтметра коэффициент деления  $K_{\text{ЕДН}}$  составил  $K_{\text{ЕДН}} = 7653$ , а время нарастания переходной характеристики  $t_{\text{nx}} \leq 30 \text{ нс}$ . На самом деле время нарастания переходной характеристики данного ЕДН гораздо короче 30 нс, поскольку длительность фронта на осциллограммах складывается из переходных характеристик всех элементов разрядной цепи (см. рис. 5) – как высоковольтных, так и низковольтных, включая регистрирующий осциллограф. А ЕДН

среди этих элементов – один из самых безинерционных, поскольку и высоковольтное его плечо, и низковольтное плечо, выполнены малоиндуктивными. Ёмкость низковольтного плеча ЕДН выполнена между промежуточным кольцевым и охватывающим его низковольтным электродом путем расположения между этими электродами двух слоёв фторопластовой ленты (отмеченной позицией 3 на рис. 3). Толщина каждого слоя – 20 мкм. За счет технологических не плотностей примем, что толщина воздушных зазоров между промежуточным и низковольтным электродами составляет 10 мкм. Тогда ёмкость  $C_{\text{нв}}$  низковольтного плеча ЕДН можно рассчитать по формуле: (9). В (9) коэффициент  $K_c=1,8$  в нашем случае, поскольку в образовании ёмкости между промежуточным и низковольтным электродом участвует вся площадь  $S$  наружной поверхности промежуточного электрода и примерно  $0,8 \cdot S$ , т.е. примерно 80% площади внутренней поверхности промежуточного электрода  $C_{\text{нв}}=1,8 \cdot 1,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (6 \cdot 10^{-2} \cdot 0,2 \cdot 3,14) / (5 \cdot 10^{-5}) \approx 20,4 \cdot 10^{-9} (\Phi)$ .

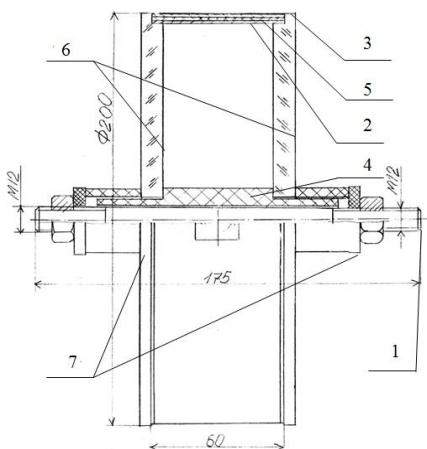


Рис. 6. Эскиз ЕДН: 1 – высоковольтный электрод ; 2 – промежуточный электрод; 3 – низковольтный электрод; 4 – диэлектрический барьер (из капролона); 5 – изоляция низковольтного плеча; 6 – кольцевые опорные щеки из оргстекла; 7 – узлы крепления



Рис. 7. Фото компактного ёмкостного делителя напряжения на 70 кВ с экранированным промежуточным электродом: а – делитель на изоляционной крышки высоковольтного импульсного трансформатора, б – делитель в сборе

Оценим ёмкость высоковольтного плеча ЕДН при помощи (10), без учета наличия барьера из твердого диэлектрика вокруг высоковольтного электрода (см. рис. 6)

$$C_{\text{вв}} \approx (2\pi\varepsilon_0 l) / \ln[2lR/a/(2R+l)] \approx (2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,175) / \ln[2 \cdot 0,175 \cdot 0,1 / 0,006 / (2 \cdot 0,1 + 1)] \approx 6,16 \cdot 10^{-12} (\Phi).$$

Теперь оценим величину ёмкости  $C_{\text{вв}}$  высоковольтного плеча ЕДН, исходя из экспериментально полученного коэффициента деления ЕДН  $K_{\text{ЕДН}}=7653$  и формулы (1) с учетом того, что  $C_{\text{вв}} \ll C_{\text{нв}}$ :

$$C_{\text{вв}} \approx C_{\text{нв}} / K_d = 20,4 \cdot 10^{-9} / 7653 \approx 2,7 \cdot 10^{-12} (\Phi).$$

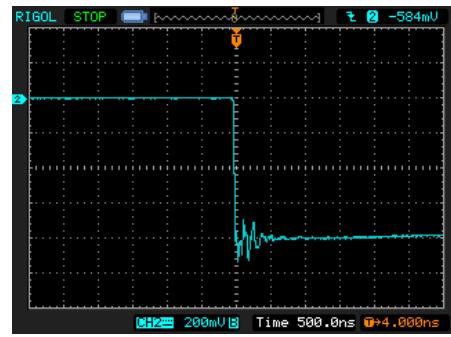


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на резистивной нагрузке по схеме на рис. 5, измеренного при помощи созданного компактного ёмкостного делителя напряжения



Рис. 9. Осциллограмма формы напряжения на резистивной нагрузке в схеме на рис. 5, полученная при помощи созданного ёмкостного делителя напряжения

Сравнивая расчетную оценку  $C_{\text{вв}}$  по формуле (10) с экспериментальной оценкой через измеренный  $K_{\text{ЕДН}}=7653$ , можно заключить, что порядок величины  $C_{\text{вв}}$  по (10) определить можно, однако, погрешность оценки по (10) велика и тем больше, по-видимому, чем меньше ширина щели  $\varepsilon_{\text{ш}}$ . Погрешность определения  $C_{\text{вв}}$  через измеренный  $K_{\text{ЕДН}}$  не превышает 20%. Прямое измерение ёмкости  $C_{\text{вв}}$  соответствующими измерителями, тестерами вносит существенную погрешность из-за малой ( $\sim 10^{-12} \Phi$ ) величины  $C_{\text{вв}}$ .

Оценим допустимую длину  $l_{\text{доп.каб}}$  коаксиального измерительного кабеля, исходя из (4), чтобы он несущественно влиял на коэффициент деления ЕДН:

$$C_k \leq 0,1 \cdot C_{\text{нв}} = 0,1 \cdot 20,4 \cdot 10^{-9} = 2,04 \cdot 10^{-9} (\Phi).$$

С учетом того, что погонная ёмкость 50-омного коаксиального кабеля  $C_{\text{п50}}=10^{-10} \Phi/\text{м}$ , получим

$$l_{\text{доп.каб}} \leq C_k / C_{\text{п50}} = (2,04 \cdot 10^{-9}) / 10^{-10} = 20,4 (\text{м}). \quad (22)$$

Оценим по (5) длительность допустимого отрезка времени  $t_{\text{доп}}$  при использовании в качестве регистрирующего устройства для сигналов с низковольтного плеча ЕДН осциллографа с низкоомным входом

$$t_{\text{доп}} \leq 0,2 \cdot R_c \cdot C_{\text{нв}} = 0,2 \cdot 50 \cdot 20,4 \cdot 10^{-9} = 2,04 \cdot 10^{-7} (\text{с}).$$

Оценим  $f_{\text{вв}}$  и  $f_{\text{нв}}$  для того, чтобы определить время нарастания  $T_a$  созданного ёмкостного делителя. Для этого оценим по (12)  $L_{\text{вв}}$ , а по (18)  $L_{\text{нв}}$  и далее  $L_{\text{нв}}$

$$L_{\text{вв}} = [\mu_0 l / (2\pi)] \cdot [\ln(2l/r) - 1] \approx [0,175 \cdot 2 \cdot 10^{-7}] \times \\ \times [\ln(2 \cdot 0,175 / 0,006) - 1] \approx 1,05 \cdot 10^{-7} (\text{Гн}).$$

В (18) выберем  $K_L=0,8$  по аналогии с выбором  $K_c=1,8$ , учитывая, что охват промежуточного электрода ЕДН низковольтным электродом со щелью приводит к уменьшению индуктивности низковольтного плеча и увеличению его емкости.

$$L_{\text{нв}} = K_L \mu_0 d_k / (2\pi r) \approx 0,8 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-5} / (2\pi \cdot 0,1) = 8 \cdot 10^{-11} (\text{Гн}/\text{м}).$$

Найдем индуктивность  $L_{\text{нв}}$  низковольтного плеча, исходя из того, что длина  $l_{\text{нв}}$  промежуточного кольцевого электрода в осевом направлении составляет  $l_{\text{нв}}=0,06$  м,

$$L_{\text{нв}} = L_{\text{нв}} \cdot l_{\text{нв}} = 8 \cdot 10^{-11} \cdot 0,06 = 4,8 \cdot 10^{-12} (\text{Гн}). \quad (23)$$

Оценим, наконец, время  $T_a$  нарастания переходной характеристики созданного делителя при помощи (8), найдя предварительно  $f_{\text{вв}}$  и  $f_{\text{нв}}$  и выбрав из них наименьшую частоту для подстановки в (8) в качестве полосы пропускаемых частот  $B$

$$f_{\text{вв}} = (0,5/\pi)(L_{\text{вв}} C_{\text{вв}})^{-0.5} \approx (0,5/3,14)(1,05 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot 2,7 \cdot 10^{-12} \Phi)^{-0.5} \approx \\ \approx 3 \cdot 10^8 \text{ Гц}; \\ f_{\text{нв}} = (0,5/\pi)(L_{\text{нв}} C_{\text{нв}})^{-0.5} \approx (0,5/3,14)(4,8 \cdot 10^{-12} \text{ Гн} \cdot 2,04 \cdot 10^{-8} \Phi)^{-0.5} \approx 5 \cdot 10^8 \text{ Гц}; \\ T_a = 0,35/f_{\text{вв}} \approx 0,35/(3,0 \cdot 10^8) \approx 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Созданный ЕДН прошел проверку при измерениях характеристик различных высоковольтных импульсов, в том числе импульсов с амплитудой до 70 кВ при длительности более 100 мкс и частоте следования более 2000 имп/с, на действующих электроустановках.

## ВЫВОДЫ

1. Сформулированы принципы создания компактных ёмкостных делителей напряжения для измерения напряжений амплитудой, по крайней мере, до 70 кВ, в том числе делителей с коэффициентом деления более 5000. В перечень принципов в том числе входят: выполнение ёмкости каждого из плеч делителя (высоковольтного и низковольтного) в виде одного простого (плоского или цилиндрического) конденсатора; выполнение высоковольтного электрода (с достаточным поперечным размером) охваченным диэлектрическим барьером и длиной порядка линейного размера делителя.

2. Создан и успешно испытан компактный ЕДН на 70 кВ, расчетное время нарастания переходной характеристики которого не превышает 1,5 нс, при измерении импульсов длительностью более 100 мкс с частотой следования более 2000 имп/с. Измеренный коэффициент деления ЕДН  $K_{\text{ЕДН}} \approx 7653$ , масса делителя  $M_{\text{ЕДН}} \approx 1,27$  кг, габаритные размеры: диаметр – 200 мм, длина (в осевом направлении) – 175 мм.

3. На примере созданного ЕДН с ёмкостью высоковольтного плеча, образованной между высоковольтным и промежуточным электродом через кольцевую щель в низковольтном электроде, подтверждено, что компактные ёмкостные делители напряжения с высоковольтным электродом, длина которого соизмерима с характерным линейным размером делителя, и экранированным промежуточным электродом имеют стабильный коэффициент деления, практически не зависящий от окружающей обстановки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. – 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.

2. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. / М. Байер, В. Бёк, К. Мёллер, В. Цаенгль; Под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.

3. Бржецицкий В.О., Ісаакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник за ред. В.О. Бржецицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПІ", Торнадо, 2005. – 926 с.

4. Разработка и создание передвижного ёмкостного делителя импульсного напряжения амплитудой до 100 кВ / М.И. Баранов, В.М. Зиньковский, Ю.П. Зябко, Н.И. Игнатенко, В.О. Лысенко // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – № 49. – С. 3-10.

5. А.С. 1319092 СССР, МКИ<sup>4</sup>Н 01 Г 4/38. Емкостный делитель напряжения / Н.И. Бойко, А.В. Ляхов, О.Л. Резинкин. – Опубл. в бюл., 1987. – № 23.

6. Бойко Н.И. Научные основы создания электротехнологических установок для высоковольтных импульсных воздействий. – Дисс. на соиск. уч. степени д.т.н. – Харьков, 2003. – 567 с.

7. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Л.: Энергия, 1973. – 176 с.

8. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Стрункий М.Г. Расчет электрической ёмкости. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 288 с.

9. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shvab A. Izmereniya na vysokom napryazhenii: Izmeritel'nye pribory i sposoby izmereniya. - 2-e izd., pererab. i dop. Per. s nem. - M.: 'Energoatomizdat, 1983. - 264 s.

2. Tehnika vysokih napryazhenij: teoretycheskie i prakticheskie osnovy primeneniya: Per. s nem. / M. Bejer, V. Bek, K. Meller, V. Caengl'; Pod red. V.P. Larionova. - M.: 'Energoatomizdat, 1989. - 555 s.

3. Brzhezic'kij V.O., Isaakova A.V., Rudakov V.V. ta in. Tehnika i elektrofizika visokih naprug: Navch. posibnik za red. V.O. Brzhezic'kogo ta V.M. Mihajlova. - Harkiv: NTU "HPI", Tornado, 2005. - 926 s.

4. Razrabotka i sozdanie peredvizhnogo emkostnogo delitelya impul'snogo napryazheniya amplitudoj do 100 kV / M.I. Baranov, V.M. Zin'kovskij, Yu.P. Zjabko, N.I. Ignatenko, V.O. Lysenko // Visnik NTU "HPI". - 2011. - № 49. - S. 3-10.

5. A.S. 1319092 SSSR, MKI<sup>4</sup>N 01 G 4/38. Emkostnyj delitel' napryazheniya / N.I. Bojko, A.V. Lyahov, O.L. Rezinkin. - Opubl. v byul., 1987. - № 23.

6. Bojko N.I. Nauchnye osnovy sozdaniya 'elektrotehnologicheskikh ustanovok dlya vysokovol'tnyh impul'snyh vozdeystviy'. - Diss. na soisk. uch. stepeni d.t.n. - Har'kov, 2003. - 567 s.

7. Kuchinskij G.S. Vysokovol'tnye impul'snye kondensatory. - L.: 'Energiya, 1973. - 176 s. 8. Iossel' Yu.Ya., Kochanov 'E.S., Strunskij M.G. Raschet 'elektricheskoy emkosti. - 2-e izd., pererab. i dop. - L.: 'Energoizdat. Leningr. отд-ние, 1981. - 288 s.

9. Kalantarov P.L., Cejtljin L.A. Raschet induktivnostej: spravochnaya kniga. - 3-e izd., pererab. i dop. - L.: 'Energoatomizdat. Leningr. отд-ние, 1986. - 488 s.

Поступила 20.10.2012

Бойко Николай Иванович, д.т.н.,

Евдошенко Леонид Свиридович, с.н.с.,

Иванов Владимир Михайлович,

Христенко Олег Александрович

НИПКИ "Молния"

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47

тел. (057) 7076183, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Ivanov V.M., Khristenko O.A.

A compact 70 kv capacitive voltage divider with a shielded transfer electrode.

A compact capacitive voltage divider with dividing coefficient  $K_{\text{cdv}}=7653$  is created, successfully tested and put into operation. The divider is intended for operation with various-form voltage of the amplitude up to 70 kV, the transient characteristic rise time not exceeding 1,5 ns. The divider diameter is 200 mm, its length is 175 mm and the mass is 1,27 kg.

**Key words – capacitive voltage divider, high-voltage electrode, low-voltage electrode, shielded transfer electrode, transient characteristic.**

## ТОНКИЙ КРУГОВОЙ ВИТОК С РАЗРЕЗОМ НАД ТОНКОСТЕННЫМ ЛИСТОМ МЕТАЛЛА

*У рамках статті проведено аналіз електромагнітних процесів, що збуджуються полем плоского "незамкнутого" кругового витка, розташованого над тонкостінним немагнітним листом металу. Отримано основні залежності для розрахунку просторово-часового розподілу вихревих струмів в розглянутої індукторній системі. За отриманими аналітичним співвідношенням проведені числові оцінки і побудовані об'ємні епюри амплітудно-просторового розподілу густини індукованого струму.*

*В рамках статьи проведен анализ электромагнитных процессов, возбуждаемых полем плоского "незамкнутого" кругового витка, расположенного над тонкостенным немагнитным листом металла. Получены основные зависимости для расчета пространственно-временного распределения вихревых токов в рассматриваемой индукторной системе. По полученным аналитическим соотношениям проведены численные оценки и построены объемные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности индуцированного тока.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Для обработки металлов силами возбуждаемого магнитного поля широко применяются плоские одновитковые соленоиды [1-3].

Для существенного упрощения решения поставленной задачи по исследованию электромагнитных процессов, соленоиды представляются замкнутыми круговыми контурами. Это позволяет ввести условие аксиальной симметрии [4-6].

В реальных условиях виток не может быть замкнутым круговым контуром, поскольку он является элементом цепи, последовательно включаемым с источником мощности. То есть, виток – "незамкнут", он имеет разрез и функция, описывающая азимутальное распределение возбуждающего тока, терпит разрыв второго рода. Поэтому в дальнейшем одинаково справедливы термины "виток с разрезом" или "виток с разрывом". Аксиальная симметрия нарушается тем больше, чем больше расстояние между электрическими выводами к источнику мощности. Следовательно, широко применяемые симметричные модели расчёта реальных систем "виток – проводящий объект", основанные на их аксиальной симметрии, являются не совсем адекватными протекающим в них электромагнитным процессам.

### Анализ основных достижений и публикаций.

Возбуждение вихревых токов в тонкостенных металлах, в отличие от случая массивных и достаточно хороших проводников, происходит в условиях интенсивного проникновения действующих электромагнитных полей. Т.е. проводник "прозрачен" для действующих полей. Исследование этих процессов для магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) – задача, безусловно, весьма актуальная и практически значимая [7, 8].

Наиболее актуальными вопросами в МИОМ являются вопросы связанные с индукторными системами – инструментами магнитно-импульсного воздействия. Такие индукторные системы, как "одновитковый индуктор – проводящая среда", представляют собой типичные конструкции инструментов, например, как для раздачи и обжиму трубчатых заготовок, так и для плоской штамповки. Поскольку нарушение аксиальной симметрии формы источника поля – ин-

дуктора ведёт к искажению силового воздействия на обрабатываемый объект, то такое допущение ведёт к неадекватной формулировке задач проектирования инструментов. Последний фактор объясняет многие неудачные применения электромагнитных полей для решения насущных технологических проблем [9]. Отметим, что в научной периодике описаны приближённые методы решения подобных задач прикладной электродинамики, например, [10]. Их достоинства и недостатки в сравнении с классическими походами – предмет отдельной дискуссии. Что же касается рассматриваемых в данной работе вопросов, то в этих публикациях отсутствует необходимый для практики МИОМ анализ и выводы по изменению показателей действенности инструментов при нарушении аксиальной симметрии в их конструктивном исполнении.

**Цель настоящей работы** – расчёт пространственно-временного распределения вихревых токов, возбуждаемых полем плоского "незамкнутого" кругового витка, расположенного над тонкостенным немагнитным листом металла.

### РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Расчётная модель представлена на рис. 1, где  $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$  – направляющие орты координат в выбранной цилиндрической системе координат.

Примем следующие допущения.

- Бесконечно протяжённый в поперечных направлениях лист толщиной –  $d$  выполнен из немагнитного металла с удельной электропроводностью –  $\gamma$ .

- Виток индуктора расположен над поверхностью пластины на расстоянии –  $h$ , его радиус –  $R$ , поперечные размеры настолько малы, что влияние металла витка на электромагнитные процессы несущественно, и, математически, расположение возбуждающего тока индуктора можно описать произведением дельта-функций Дирака  $\sim \delta(z-h)\delta(r-R)$ .

- В местах соединения витка (соответствующие токопроводы перпендикулярны к его плоскости) и источника мощности имеет место "разрыв" по азимуту, описываемый функцией

$$f(\varphi) = \eta(\varphi - \varphi_0) - \eta(\varphi - (2\pi - \varphi_0)), \quad (1)$$

где  $\eta(\varphi)$  – ступенчатая функция Хевисайда,  $2\varphi_0$  – ве-

личина "разрыва" в витке, выраженная в терминах азимутального угла.

- По витку протекает азимутальный ток с плотностью  $-j_{\varphi i}(t, r, \varphi, z)$ ,

$$j_{\varphi i}(t, r, \varphi, z) = j(t) \cdot \delta(r - R) \cdot \delta(z - h) \cdot f(\varphi), \quad (2)$$

где  $j(t)$  – амплитудно-временная зависимость,  $t$  – время.

Временные характеристики возбуждающего тока таковы, что  $\omega \cdot t \ll 1$ , где  $\omega$  – характерная циклическая частота сигнала,  $\tau = \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$  – характерное время диффузии в металлический лист [2, 11-14].

**Примечание.** Необходимо подчеркнуть, что допущение о форме возбуждающего тока с азимутальным разрывом первого рода исключает влияние токоподводов к витку, но не противоречит требованию непрерывности линий тока  $-div j_{\varphi i}(t, r, \varphi, z) = 0$ , формально следующему из системы уравнений Максвелла, записанной для нулевых начальных условий в [15]. Принятая модель расчёта предполагает их замкнутость в элементах разрядного контура (рис.1), частью которого является и виток, а не в пространстве между местами его подсоединения к источнику за счёт априори пренебрежимо малых токов смещения.

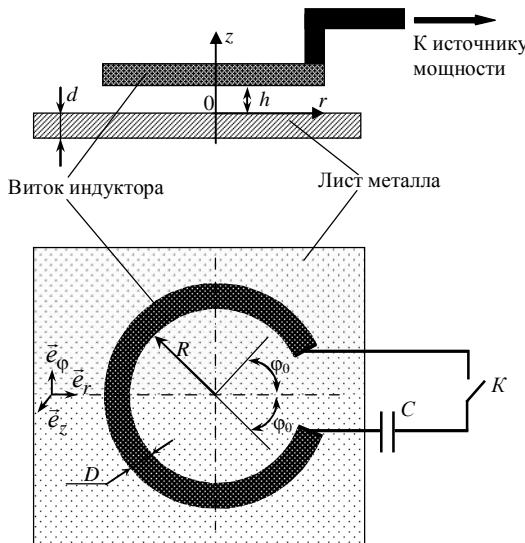


Рис. 1. Плоский "незамкнутый" виток над тонкостенным листом металла

Не останавливаясь на математических операциях по интегрированию уравнений Максвелла, запишем аналитическую пространственно-временную зависимость для линейной плотности азимутальной составляющей тока, индуцированного в тонкостенном листовом металле полем "разомкнутого" витка индуктора, полученную в [15].

$$\begin{aligned} J_{\varphi}^{(2)}(t, r, \varphi) = & -\frac{\tau \cdot R}{(8d^2)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \times \\ & \times \int_{0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\varphi_0) \cdot [J_{n+1}(\lambda R) - J_{n-1}(\lambda R)] \times \\ & \times [J_{n+1}(\lambda r) - J_{n-1}(\lambda r)] \cdot e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cos(n\varphi) d\lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{где } F_n(\varphi_0) = \begin{cases} \left( -\frac{2 \cdot \sin(n \cdot \varphi_0)}{\pi \cdot n} \right), & n \neq 0, \\ \left( 1 - \frac{\varphi_0}{\pi} \right), & n = 0, \end{cases}$$

$J_n(\lambda r)$  – функция Бесселя  $n$ -го порядка,  $\lambda$  – параметр преобразования.

Достоверность выражения (3) можно установить предельным переходом к зависимости, которая может быть получена из формул авторской работы для поля аксиально-симметричного витка над тонкостенным проводящим листом.

Так, для "замкнутого" витка с  $\varphi_0 \approx 0$  зависимость (3) принимает вид:

$$\begin{aligned} J_{\varphi}^{(2)}(t, r, \varphi) = & -\frac{\tau \cdot R}{(2d^2)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \times \\ & \times \int_0^{\infty} J_1(\lambda \cdot R) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} d\lambda. \end{aligned} \quad (4)$$

Результат (4) с точностью до обозначений совпадает с выражением для азимутальной компоненты вихревого тока, возбуждаемой тонким (ширина стремится к нулю) аксиально-симметричным витком [5, 7-9, 14].

Следует обязательно подчеркнуть, что временная зависимость индуцированного тока, так же, как и в случае витка без разреза, остаётся равной первой производной от возбуждающего тока индуктора.

### ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Зависимость (4) преобразуем к виду, удобному для проведения численных оценок.

Введём новую переменную интегрирования  $x = \lambda R$ ,  $\lambda = x/R$ ,  $d\lambda = 1/R$ ,  $x \in [0, \infty]$ .

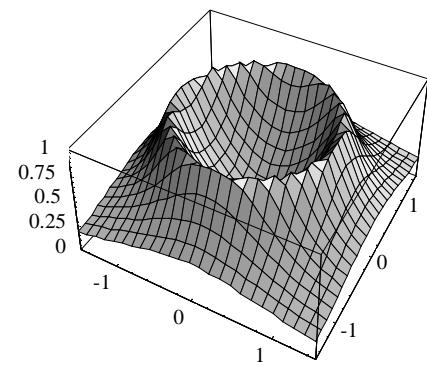
Результат после необходимых преобразований запишем в виде относительной безразмерной величины –

$$J_{omn} = -\frac{J_{\varphi}^{(2)}(t, r, \varphi)}{\left( \frac{\tau \cdot R}{2d^2} \right) \cdot \frac{dj(t)}{dt}}.$$

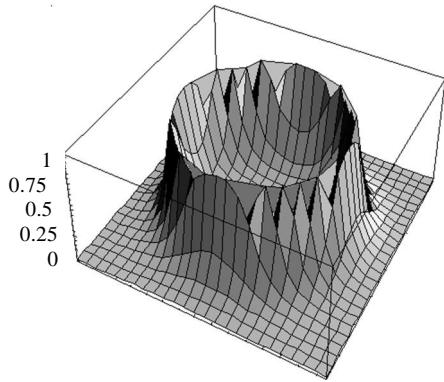
$$\begin{aligned} J_{omn} = & \int_0^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\varphi_0) [J_{n+1}(x) - J_{n-1}(x)] e^{-x \frac{h}{R}} \frac{(1 - e^{-x \frac{d}{R}})}{x} \times \\ & \times \left[ J_{n+1}(x \frac{r}{R}) - J_{n-1}(x \frac{r}{R}) \right] \cos(n\varphi) dx. \end{aligned} \quad (5)$$

Для выполнения конкретных оценок примем те же исходные данные, что и ранее:  $R=0.025$  м,  $h=0.0025$  м,  $d=0.001$  м.

Результаты настоящих вычислений оформлены в виде объёмных эпюр, рис. 2-4, где  $\Theta$  – угол "разрыва" в витке в относительных единицах. Здесь же для сравнения приведены аналоги, полученные ранее для идеально проводящей среды. Графические зависимости даны в относительных единицах с нормировкой на амплитуду индуцированного тока в аксиально-симметричной системе. "Провалы" на эпюрах соответствуют "разрывам" в витке.

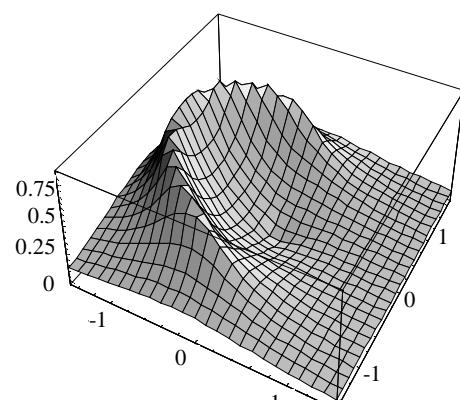


а

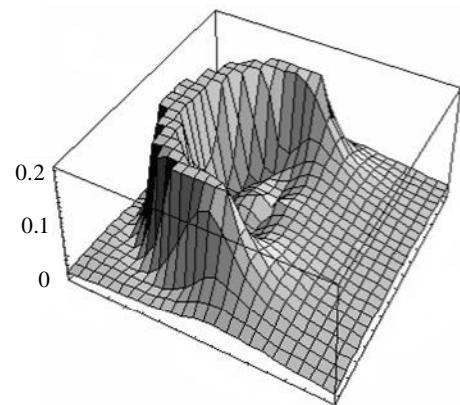


б

Рис. 2. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности тока, индуцированного аксиально-симметричным витком (без "разрыва") в металле тонкостенного листа (а) и на поверхности идеального проводника (б)



а



б

Рис. 4. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности тока, индуцированного витком с "разрывом",  $\Theta=0.5$  в металле тонкостенного листа (а) и на поверхности идеального проводника (б)

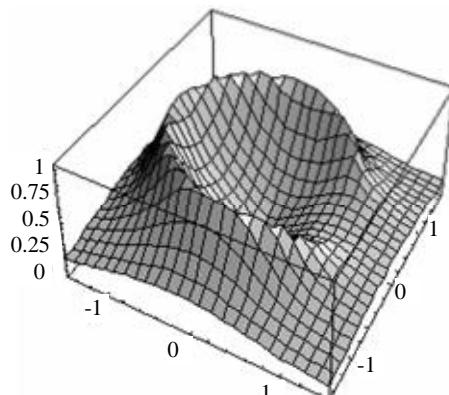
## ВЫВОДЫ

Проведенные вычисления приводят к следующим выводам.

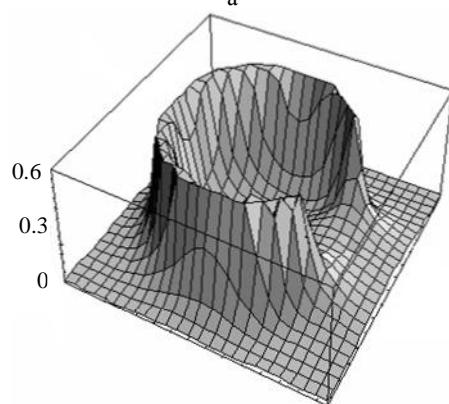
- Проникновение действующего поля сквозь металл тонкостенного листа в конечном итоге приводит к "растеканию" индуцированного тока в поперечном направлении от области непосредственно под витком индуктора. Справедливость данного утверждения достаточно ярко иллюстрируется результатами расчёта для двух крайне противоположных идеализаций: "абсолютно прозрачный" проводник (а) и "абсолютно не прозрачный" (идеальный) проводник.

- При увеличении ширины "разреза" в случае тонкостенного листового металла амплитуда индуцированного тока непосредственно под витком индуктора падает существенно меньше, чем в случае идеального проводника.

- Физически, данный факт можно объяснить тем, что с ростом электропроводности индуцированный ток всё более концентрируется под витком, и нарушение его аксиальной симметрии отражается на амплитуде вихревых токов более значимо, чем в случае низкой электропроводности, когда снижение этой амплитуды уже имело место за счёт диффузионных процессов и сопровождающего "растекания" тока в поперечных направлениях.



а



б

Рис. 3. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности тока, индуцированного витком с "разрывом",  $\Theta=0.2$  в металле тонкостенного листа (а) и на поверхности идеального проводника (б)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в проводящих средах / А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая – К: ИЭ НАНУ, 1999. – 362 с.
- Шнеерсон Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов / Г. А. Шнеерсон. – [2-е изд.] – М.: – Энергоатомиздат, 1992. – 200 с.
- Магнитно-импульсное притяжение листовых металлов – перспективное направление в развитии электромагнитной штамповки: XI Міжнародна науково-технічна конференція ["Проблеми сучасної електротехніки - 2010"]. (Київ 1-3 червня, 2010.) / Ю.В. Батигин, А.В. Гнатов. – К.: Технічна електродинаміка, Тематичний випуск, 2010. – Ч.1. – С. 175-180.
- Батыгин Ю.В. Силы, действующие на тонкостенный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида / Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко А.Ю. // Технічна електродинаміка. – К.: 2010. – № 1. – С. 9-14.
- Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монографія / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Харків: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
- Батыгин Ю.В. Вихревые токи в тонких металлических листах при магнитно-импульсной обработке металлов / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, А.Ю. Бондаренко // Электричество. – М.: 2009. – № 9. – С. 61-65.
- Батыгин Ю.В. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Е.А. Чаплыгин // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – №3. – С. 69-73.
- Батыгин Ю.В. Вихревые токи в плоских листовых металлических заготовках / Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 5. – С. 54-59.
- Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий (научное издание). Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей редакцией д.т.н., профессора Батыгина Ю.В. / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко. Харьков: Изд. "МОСТ- Торнадо". 2003. – 288 с.
- Васецкий Ю.М. Приближённая модель для расчёта переменного магнитного поля произвольного контура с учётом вихревых токов в проводящем полупространстве / Ю.М. Васецкий, Л.В. Городжа И.Л. Мазуренко – К.: Технічна електродинаміка, Тематичний випуск [Моделювання електронних, енергетичних та технологічних систем]. – 1999. – Ч. 1. – С. 83-99.
- Мэтьюз Дж. Математические методы физики / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер. Пер. с англ. канд. физ.-мат наук В.П. Крайнова. М: Атомиздат, 1972. – 399 с.
- Гнатов А.В. Расчет электромагнитных процессов в индукционной индукторной системе с массивным экраном конечной толщины / А.В. Гнатов // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 5. – С. 59-62.
- Батыгин Ю.В. Цилиндрический виток конечной ширины с разрезом над идеально проводящим массивным проводником / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Д.О. Смирнов // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 2. – С. 56-60.
- Гнатов А.В. Прогрессивные технологии. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монографія / А.В. Гнатов, Ю.В. Батыгин, А.Н. Туренко. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 238 с.
- Гнатов А.В. Электромагнитные процессы в индукторной системе с тонким круговым витком с разрезом над тонкостенным листом металла / А.В. Гнатов // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 5. – С. 51-55.

**Bibliography (transliterated):** 1. Podol'cev A.D., Kucheryavaya I.N. 'Elementy teorii i chislennogo rascheta elektromagnitnyh processov v provodyaschih sredah / A.D. Podol'cev, I.N. Kucheryavaya - K: I'E NANU, 1999. - 362 s. 2. Shneerson G. A. Polya i perehodnye processy v apparatu sverh sil'nyh tokov / G. A. Shneerson. - [2-e izd.] - M.: - 'Energoatomizdat, 1992. - 200 s. 3. Magnitno-impul'snoe prityazhenie listovyh metallov - perspektivnoe napravlenie v razvitiii elektromagnitnoj shtampovki: II Mizhnarodna naukovo-tehnichna konferenciya ["Problemi suchasnoi elktrotetchniki - 2010"]. (Kyiv 1-3 chervnya, 2010.) / Yu.V. Batigin, A.V. Gnatov. - K.: Tehnichna elektrodinamika, Tematichniy vypusk, 2010. - Ch.1. - S. 175-180. 4. Batygin Yu.V. Sily, dejstvuyuschie na tonkostennyj provodnik, v pronikayuschem pole ploskogo odnovitkovogo solenoida / Yu.V. Batygin, A.Yu. Bondarenko A.Yu. // Tehnichna elektrodinamika. - K.: 2010. - № 1. - C. 9-14. 5. Turenko A.N. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij. Tom 3. Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennyh metallov impul'snymi magnitnymi polyami: monografiya / A.N. Turenko, Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov. - Harkiv: HNADU, 2009. - 240s. 6. Batygin Yu.V. Vihrevye tokи v tonkih metallicheskikh listakh pri magnitno-impul'snoj obrabotke metallov / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij, A.Yu. Bondarenko // Elektrichestvo. - M.: 2009. - № 9. - S. 61-65. 7. Batygin Yu.V. Osobennosti tokov, induciruvannyh nizkochastotnym polem odnovitkovogo solenoida v ploskih listovyh metallah / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij, E.A. Chaplygin // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2005. - №3. - S. 69-73. 8. Batygin Yu.V. Vihrevye toki v ploskih listovyh metallicheskikh zagotovkah / Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2006. - № 5. - S. 54-59. 9. Batygin Yu.V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij (nauchnoe izdanie). Tom 1. Izdanie vtoroe, pererabotannee i dopolnennoe. Pod obschej redakcijey d.t.n., professora Batygina Yu.V. / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij, L.T. Himenko. Har'kov: Izd. "MOST-Tornado". 2003. - 288 s. 10. Vascekij Yu.M. Priblizhennaya model' dlya rascheta peremennogo magnitnogo polya proizvol'nogo kontura s uchetom vihrevykh tokov v provodyaschem poluprostranstve / Yu.M. Vascekij, L.V. Gorodza I.L. Mazurenko - K.: Tehnichna elektrodinamika, Tematichniy vypusk [Modelyuvannya elektronnih, energetichnih ta tehnologichnih sistem]. -1999. - Ch. 1. - S. 83-99. 11. Matematicheskie metody fiziki / Dzh. M'et'yuz, R. Uoker. Per. s angl. kand. fiz.-mat nauk V.P. Krajnova. M: Atomizdat, 1972. - 399 s. 12. Gnatov A.V. Raschet elektromagnitnyh processov v induktornoj sisteme s massivnym ekranom konechnoj tolschinoy / A.V. Gnatov // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 5. - S. 59-62. 13. Batygin Yu.V. Cilindricheskij vitok konechnoj shiriny s razrezom nad ideal'no provodyaschim massivnym provodnikom / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, D.O. Smirnov // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2011. - № 2. - S. 56-60. 14. Gnatov A.V. Progressivnye tehnologii. Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennyh metallov impul'snymi magnitnymi polyami: monografiya / A.V. Gnatov, Yu.V. Batygin, A.N. Turenko. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. - 238 s. 15. Gnatov A.V. Elektromagnitnye processy v induktornoj sisteme s tonkim krugovym vitkom s razrezom nad tonkostennym listom metalla / A.V. Gnatov // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2012. - №5.-S.51-55.

Поступила 03.02.2012

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., доц.  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный  
университет  
кафедра автомобильной электроники  
61002, Харьков, ул. Петровского 25  
тел. (057) 7003852, e-mail: kalifus@yandex.ru

Gnatov A.V.

**A thin circular turn with a cut above a thin-walled sheet metal.**

Analysis of electromagnetic processes excited by the field of an open flat circular coil placed above a thin-walled sheet metal has been carried out in this article. The basic relations for time-space distribution calculation of eddy currents in the considered inductor system have been derived. The obtained analytical relations have allowed making numerical evaluations and plotting three-dimensional amplitude-space distribution diagrams of induced current density in the thin-walled sheet metal.

**Key words – magnetic pulse metal working, inductor system, electromagnetic processes, thin-walled sheet workpiece, eddy-currents.**

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ САМОРЕГЕНЕРАТИВНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ СТРУМУ З МАЛИМ ЧАСОМ КОМУТАЦІЇ

*На основі аналізу розподілу електричного поля в об'ємі саморегенеративного запобіжника визначено активну зону лужного металу, що змінює фазовий стан в процесі комутації. Ці дані застосовано далі для побудови математичної моделі для чисельного аналізу обмеження струму. Отримано часові залежності для значень струму запобіжника і вимикача, опору лужного металу, втрат енергії на комутацію.*

*На основании анализа распределения электрического поля в объеме самовосстанавливющегося предохранителя определена активная зона щелочного металла, изменяющаяся в процессе коммутации. Эти данные применены далее для построения математической модели для численного анализа ограничения тока. Получены временные зависимости для значений тока предохранителя и выключателя, сопротивления щелочного металла, потерь энергии на коммутацию.*

### 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

На сучасному етапі розвитку електроапаратуро-будування створено цілий комплекс апаратних засобів, що здійснюють захист електротехнічного устаткування в широкому діапазоні напруг і струмів з характерним часом комутації  $\tau \geq 10^{-2}...10^{-3}$  с [1-3]. На основі аналізу стану розробки електричної апаратури та умов її експлуатації можна визначити сукупність вимог до її технічних характеристик: малий опір контактної системи комутаційного апарату у провідному стані, великий опір у непровідному стані, малий час комутації, малі втрати енергії на комутацію, постійна готовність до роботи, малий час відновлення характеристик після комутації, великий ресурс, малі маса і габарити, помірна вартість.

Проте слід зазначити, що на теперішній час ще не створено електричної апаратури, яка б одночасно відповідала всім зазначенним вимогам для комутаційних режимів з тривалістю, меншою ніж  $5 \cdot 10^{-3}$  с. Тому, наприклад, для швидкого розмикання електричних кіл, застосовують сукупність елементів комутаційної апаратури, що діє за різними електрофізичними принципами [2-4]. Так, швидке обмеження великих струмів може здійснюватися, наприклад, за схемою, наведеною на рис. 1,а. На ній послідовно з автоматичним вимикачем  $S$  під'єднано запобіжник  $F$ , зашунтований резистором  $R_1$ , що обмежує струм. В робочих умовах струм тече, головним чином, через запобіжник, опір якого в цей час є меншим, ніж у резистора  $R_1$ . Під час короткого замикання опір запобіжника зростає так, що практично весь струм починає протікати через резистор. Тривалість перемикання струму є дуже малою і завершується до того, як струм досягне максимального значення. Ввімкнення в коло опору  $R_1$  викликає значне обмеження струму, який без зайвих труднощів переривається автоматичним вимикачем  $S$  при найближчому переході струму через нуль.

Недолік, пов'язаний з необхідністю заміни перегорілих вставок запобіжників, відсутній у вимикачах із запобіжниками, що мають властивості саморегенерації PPF (Permanent Power Fuse), вперше розробленими компанією Міцубісі [1]. Електрична схема такого вимикача не відрізняється від схеми обмеження струму вимикачем і запобіжником звичайного типу (рис. 1,а).

Хід перемикання струму в схемі наведено на рис. 1,б. В момент  $t_1$  внаслідок швидкого збільшення опору запобіжника  $F$  починається перемикання струму  $I_2$  в резистор  $R_1$ . Цей процес закінчується в момент часу

$t_2$ . Через резистор протікає тепер обмежений струм  $I_1$ , а через запобіжник – малий струм  $I_2 = I_0$ , який утримується до моменту  $t_3$  переходу струму через нуль і вимкнення кола вимикачем. Повний час аварії  $t_{av}$ , як наслідок, є меншим, ніж тривалість півхвилі струму короткого замикання. На рис. 1 також позначено:  $t_{nep}$  – час переключення струму із запобіжника в резистор струмообмеження;  $t_R$  – тривалість протікання струму в резисторі  $R_1$ ;  $t_0$  – час протікання струму через лужний метал в пароподібному стані, а  $I_{max}$  – максимальне значення струму вимикача  $S$ .

Робота саморегенеративного запобіжника (рис. 2) заснована на використанні властивостей лужного металу, що застосовується для створення активної (комутаційної) частини шляху струму між електродами 1, 8. Серед лужних металів найкращим виявився натрій [4].

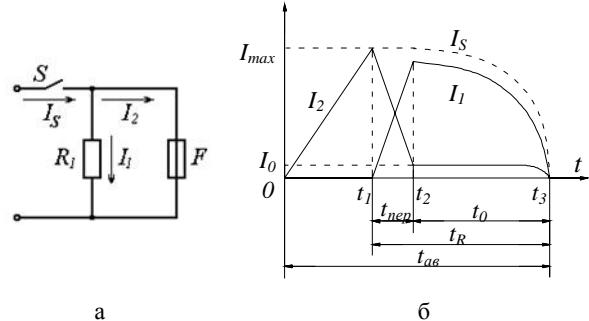


Рис. 1. Перехідні процеси в схемі з обмеженням струму:  
а – схема обмеження струму; б – ідеалізований процес комутації струму

В конденсованому стані він має велику питому електричну провідність, а в газоподібному – великий опір та велику питому теплопровідність. Крім того, важливою фізичною особливістю натрію є те, що він мало збільшує свій об'єм в газоподібному стані у порівнянні з твердим станом, а також має відносно малу температуру пароутворення. Завдяки цьому комутаційна апаратура з властивостями саморегенерації характеризується значно більшою ефективністю обмеження струму, ніж пристрой класичної дії [4].

В твердому і рідкому стані активна зона протікання струму, заповнена натрієм 5, має малий опір. Під час короткого замикання натрій нагрівається до температури кипіння і починає змінювати свій фізичний стан з конденсованого на газоподібний, що характеризується високими значеннями опору та тиску. Поршень 6, на який діє великий тиск пари лужного

металу, надає їй можливість розширення, що зменшує максимальне значення тиску. Після переривання струму вимикачем натрій охолоджується і з газоподібного стану знову переходить в конденсований. Конструкція запобіжника повинна забезпечувати міцність на розрив та безпеку експлуатації.

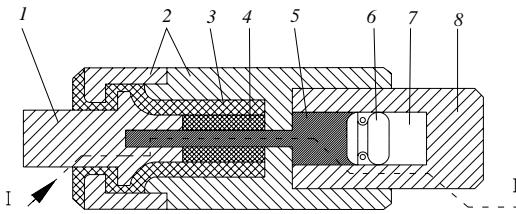


Рис. 2. Конструкція саморегенеративного запобіжника: 1,8 – приєднувальні зажими (електроди); 2 – металеві елементи корпусу; 3 – фасонна керамічна втулка; 4 – керамічна втулка з окису берилію; 5 – лужний метал (натрій); 6 – поршень; 7 – камера високого тиску

Час регенерації обмежувача (тривалість від моменту відключення струму до поновлення провідного стану) залежить від значення струму запобіжника, а також від інтенсивності теплообміну між натрієм та іншими елементами його конструкції. За експериментальними даними цей час, зазвичай, становить не менше п'яти-шести секунд [4].

Таким чином, само регенеративні запобіжники є перспективними комутаційними апаратами, які спроможні забезпечити велику швидкість комутації. Проте до теперішнього часу не створено кілької теорії їх функціонування з урахуванням комплексу електрофізичних процесів, що відбуваються в них під час комутації. Це обмежує можливості їх оптимального проектування. Тому метою даної роботи є побудова та обґрунтування математичної моделі комутаційних процесів в саморегенеративних запобіжниках для чисельного визначення їх комутаційних характеристик.

## 2. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В САМОРЕГЕНЕРАТИВНОМУ ЗАПОБІЖНИКУ

Для моделювання процесу втрати запобіжником електропровідності необхідно визначити розміри активної зони рідкого металу. Для цього потрібно розв'язати проблему теорії поля електричних струмів. Її можна сформулювати як знаходження функції потенціалу, що задовольняє диференціальному рівнянню (1) в часткових похідних другого порядку еліптичного типу для циліндричної симетрії розрахункової області. Для вирішення поставленого завдання застосовано чисельний метод верхньої релаксації [5]. Реалізоване на основі цього методу програмне забезпечення [6] успішно використовувалося для аналізу роботи різних вузлів високовольтного устаткування [6, 7].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – питома електропровідність середовища;  $\phi$  – електричний потенціал;  $r, z$  – відповідно радіальна та аксіальна координата.

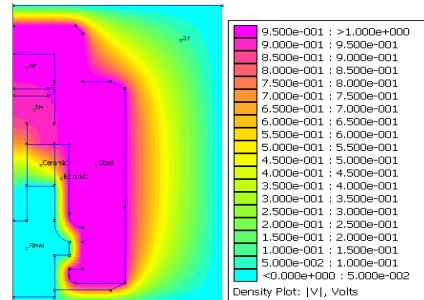
За відомим розподілом потенціалу напруженість електричного поля  $E$ , її модуль та густина струму  $i$  визначаються з використанням рівнянь (2), (3).

$$E = -\operatorname{grad} \phi = -\left( r \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right), \quad (2)$$

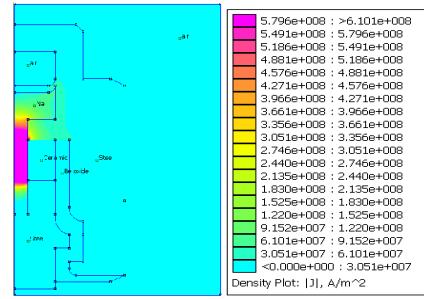
$$|E| = \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad i = \sigma E. \quad (3)$$

Для однозначного вирішення проблеми було задано граничну умову Неймана  $\partial \phi / \partial x$  на осі симетрії та нульові умови за потенціалом ( $\phi = 0$ ) на всіх інших зовнішніх межах розрахункової області (рис. 3). Електричний потенціал верхнього електроду визначався відносно одиниці. Нижній електрод вважався заземленим.

Результати обчислень електричного потенціалу в об'ємі запобіжника, отримані за методом верхньої релаксації співпадають з результатами розрахунку з використанням пакету FEMM 4.2 (рис. 3). Так, на рис. 3, а наведено розподіл електричного потенціалу в об'ємі саморегенеративного запобіжника, а на рис. 3, б чітко виражена зона максимальної густини струму, яка розташована в області, зайнятій лужним металом.



а



б

Рис. 3. Розподіл електричного потенціалу (а) і густини струму (б) в об'ємі саморегенеративного запобіжника

Отримані результати дозволили, зокрема, визначити розміри активної зони лужного металу, яка відповідає зоні максимальної густини струму, де відбувається найбільш інтенсивне перетворення електричної енергії в теплову. Ці дані використані далі для обчислення перехідного процесу втрати провідності в результаті зміни фазового стану лужного металу під дією інтенсивного нагріву.

## 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В САМОРЕГЕНЕРАТИВНОМУ ЗАПОБІЖНИКУ

Для аналізу процесів протікання струму в саморегенеративному запобіжнику необхідно застосувати математичний апарат теорії поля, зокрема розглянути перехідний комутаційний процес у наближенні магнітної гідродинаміки [7, 8]. Такий підхід дозволяє коректно враховувати не тільки електродинамічні процеси в струмопровідній області міжелектродного проміжку, просторово-часове перетворення електричної енергії в джоулеве тепло, але й взаємодію електромагнітних,

гідродинамічних і термодинамічних процесів, що супроводжують це перетворення і впливають на комутаційні характеристики електричного апарату.

В даному випадку конструкція запобіжника має циліндричну симетрію (рис. 2). З її урахуванням на рис. 4 наведено схему заміщення для розрахунку процесів комутації під час введення енергії в активну зону рідкого металу. Довжина зони з рідким металом набагато перевищує її радіус. Тому електромагнітні процеси в ній можна вважати одновимірними, що змінюються в радіальному напрямку. В такому разі рівняння Максвелла, записані в циліндричній системі лагранжевих масових координат без урахування струмів зміщення, мають вигляд [8]

$$i = \rho \frac{\partial(r^\xi H)}{\partial s}, \quad \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{H}{\rho r^\xi} \right) = \frac{\partial E}{\partial s}, \quad (4)$$

де  $E$ ,  $H$  – напруженість електричного і магнітного поля, відповідно;  $r$  – просторова радіальна координата;  $t$  – час;  $\rho$  – густини середовища;  $s$  – лагранжева масова координата ( $ds = \rho r dr$ );  $\xi = 1$  у разі циліндричної симетрії;  $\mu_0$  – магнітна стала.

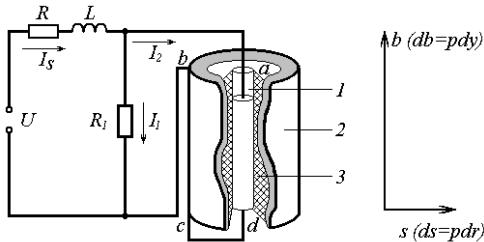


Рис. 4. Схема заміщення для розрахунку введення енергії в активну зону рідкого металу саморегенеративного запобіжника:  $R$ ,  $L$  – активний опір та індуктивність контуру навантаження;  $R_1$  – опір, паралельний запобіжнику (згідно рис. 1, а). На схемі позначено: 1 – рідкий метал (натрій); 2 – зворотний струмопровід; 3 – діелектриче середовище

Взаємний зв'язок між характеристиками електромагнітного поля і властивостями середовища вирається законом Ома в диференціальній формі, рівнянням для густини електромагнітної сили, що діє на елемент об'єму плазми в перерахунку на одиницю маси і виразом для питомої об'ємної потужності

$$i = \sigma E, \quad f = \frac{\mu_0 i H}{\rho}, \quad q = \sigma E^2, \quad (5)$$

де  $f$  – густини електромагнітної сили на одиницю маси;  $q$  – потужність джерел теплоти в перерахунку на одиницю маси середовища.

Вплив гідродинамічних процесів на електродинамічні згідно (5) виявляється через рух середовища, який впливає на його густину, від якої також залежить питома електропровідність. В результаті нагріву до температури кипіння густина рідкого натрію поступово зменшується до  $\rho = 742 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ . Зменшення стає швидким в результаті зміни фазового стану металу під час інтенсивного пароутворення. Внаслідок цього розширення активної зони відбувається в аксіальному напрямку. Швидкість звуку в натрії має характерне значення  $3,2 \cdot 10^3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . З урахуванням характерних розмірів активної зони камери, що не перевищує 0,1 м, і часу комутаційних процесів  $\tau > 10^{-3} \text{ с}$  гідродинамічні збурення багаторазово перетнуть її об'єм і вирівнюють тиск в ньому. Тому в кінцевому рахунку тиск в об'ємі

запобіжника можна вважати розподіленим рівномірно в кожний момент часу і таким, що визначається нагрівом активної зони. Проте рух середовища в розрахунках необхідно відслідковувати для визначення довжини  $l$  активної зони в процесі її розширення та густини середовища  $\rho$ .

Таким чином, рух середовища моделюється у відповідності із законами збереження маси та кількості руху в декартовій системі лагранжевих масових координат

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial v}{\partial b}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial b} + f, \quad v = \frac{\partial y}{\partial t}, \quad (6)$$

де  $y$  – аксіальна просторова координата;  $b$  – лагранжева масова координата ( $db = pdy$ );  $v$  – швидкість середовища в аксіальному напрямку;  $p$  – тиск.

Застосування лагранжевих масових координат дозволяє зафіксувати масову межу області розрахунку  $b_T$  в умовах, коли закон руху середовища заздалегідь невідомий і визначати в кожний момент часу довжину  $l$  активної зони металу, що розширяється у втулці в напрямі поршня (рис. 2)

$$l = \int_0^{b_T} \frac{1}{\rho} db. \quad (7)$$

Законом збереження енергії є рівняння балансу енергії за видами: механічної, електромагнітної та теплової

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = q - p \frac{\partial v}{\partial b} - \frac{\partial W}{\partial s}, \quad (8)$$

де  $W$  – сумарний тепловий потік.

Сумарний тепловий потік в лагранжевих масових координатах визначається згідно виразу

$$W = -\chi \rho r^\xi \frac{\partial T}{\partial s}, \quad (9)$$

де  $\chi = \chi_e + \chi_m$  – питома теплопровідність, що визначається сумаю питомої електронної  $\chi_e$  і молекулярної  $\chi_m$  теплопровідностей.

Ці рівняння доповнюються рівнянням виробництва ентропії

$$T \frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial W}{\partial s} - Q_V \quad (10)$$

і широкодіапазонним ентропійним рівнянням стану [9], яке для значень ентропії  $S(V) > S_r(V)$  (тут  $S_r(V)$  – ентропія на фазовій межі), має вигляд

$$\epsilon(V, S) = E_X(V) + \exp[w(\ln V, S)], \quad V = 1/\rho, \quad (11)$$

де  $E_X(V)$  – крива холодного стиснення;  $w(\ln V, S)$  – теплова функція.

Згідно [9] функція холодного стиснення визначається таким чином

$$E_X(V) = E_0 - a/V + \exp \left[ \left( \sum_i \alpha_i x^i \right) / \left( 1 + \sum_i \beta_i x^i \right) \right] \quad (12)$$

для  $\rho \geq 742 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

$$E_X(V) = E'_0 - \exp \left[ \left( \sum_i \alpha'_i x^i \right) / \left( 1 + \sum_i \beta'_i x^i \right) \right] \quad (13)$$

для  $\rho < 742 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Теплова функція в математичній моделі подана співвідношеннями

$$w(\ln V, S) = w_0 + \left( \sum_{i,k} a_{ik} x^i S^k \right) / \left( 1 + \sum_{i,k} b_{ik} x^i S^k \right) + f(S), \quad (14)$$

$$x = -\ln V, \quad f(S) = \left( \sum_i \varphi_i S^i \right) / \left( 1 + \sum_i \xi_i S^i \right). \quad (15)$$

Значення всіх коефіцієнтів, що входять в (11) – (14), визначалися за даними робіт [11–15], отриманими за результатами динамічних вимірювань, статистичних досліджень, розрахунків хімічної рівноваги станів часткової іонізації. Наведений в них діапазон зміни термодинамічних параметрів охоплює широку область – від конденсованого стану лужного металу до плазмового.

В математичній моделі зв'язок тиску і температури з внутрішньою енергією задано загальновідомими термодинамічними співвідношеннями

$$p = -(\partial \epsilon / \partial V)_S, \quad T = (\partial \epsilon / \partial S)_V. \quad (16)$$

Оскільки вся область міжелектродного проміжку розглядається в наближенні суцільного середовища, рівняння (4) – (15) математичної моделі доповнено коефіцієнтами перенесення, що встановлюють залежності коефіцієнтів питомої теплопровідності і питомої електропровідності від густини і температури [10–12].

$$\chi = \chi(\rho, T), \quad \sigma = \sigma(\rho, T). \quad (17)$$

Співвідношення (16) безпосередньо введено в програму обчислень у вигляді таблиць функцій двох змінних. Визначення в чисельних розрахунках поточних значень функцій (16) виконано двовимірною лінійною інтерполяцією за їх табулюованими значеннями в логарифмічних змінних, що забезпечило похибку інтерполяції менше чотирьох відсотків.

Через нерівномірність розподілу характеристики активної струмопровідної зони лужного металу уздовж радіальної координати (температури, питомої електропровідності, густини) і збільшення її довжини  $l$  застосування моделі однорідного середовища для розрахунку опору в електротехнічному наближенні струмопровідної зони є некоректним. Це обумовлено впливом на характеристики протікання струму магнітного поля, нелінійних процесів передачі тепла. В такому разі опір запобіжника  $R_2$  і енергія  $Q_2$ , дисипована в ньому, в кожний момент часу визначаються за локальними характеристиками його струмопровідної області з використанням співвідношень

$$R_2(t) = l(t) / \left( 2\pi \int_0^{r_k} \sigma(r, t) \cdot r \, dr \right), \quad Q_2 = \int_0^t I_2^2 R_2(t) dt, \quad (18)$$

де  $r_k$  – радіус струмопровідної зони.

Надалі в даній роботі скрізь як радіус струмопровідної зони  $r_k$  мається на увазі саме внутрішній радіус діелектричної втулки 4 саморегенеративного запобіжника (рис. 2).

Рівняння магнітної гідродинаміки доповнено наступними граничними умовами, відповідними фізичній суті математичної моделі.

Границя умова для рівнянь електромагнітного поля (4) на осі симетрії області протікання струму відповідає нульовому значенню напруженості магнітного поля і має вигляд

$$H(0, t) = 0, \quad (19)$$

а в граничному інтервалі за межами протікання струму

$$H(r_\Gamma, t) = I_2(t) / (2\pi r_\Gamma), \quad (20)$$

де  $I_2$  – струм запобіжника.

Значення струму у (20) визначається спільним розв'язком рівнянь електромагнітного поля з рівняння-

ми зовнішнього електричного контуру. Для замкнутого контуру з циліндричною симетрією камери є справедливим рівняння Максвелла в інтегральній формі [8].

$$\oint \bar{E} dm = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu_0 l}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[ I_2(t) \ln \frac{r_\Gamma}{r_k} \right], \quad (21)$$

де  $\Phi$  – потік вектора магнітної індукції через замкнутий контур інтегрування  $m$ , що проходить уздовж поверхні циліндричної струмопровідної зони лужного металу, а далі – зовнішнім електричним колом та зворотнім струмопровідом (контур  $abcd$  на рис. 4).

Інтеграл уздовж замкнутого контуру в лівій частині рівняння (21) відповідно до схеми заміщення (рис. 4) є сумою падінь напруги на всіх елементах електричного кола, що визначаються співвідношеннями

$$\oint \bar{E} dm = L \frac{dI_S}{dt} + I_S R + E(r_\Gamma, t) - U, \quad (22)$$

$$L \frac{dI_S}{dt} + I_S R + I_1 R_1 - U = 0, \quad I_S = I_1 + I_2 \quad (23)$$

і обчислюються разом з рівняннями (4), (5), (19), (20) з урахуванням виразу для опору лужного металу  $R_2$  (18).

Система, що розглядається, має одну степінь руху в аксіальном напрямку, спрямовану в сторону поршня (рис. 2). З урахуванням конструкції запобіжника краєву умову за швидкістю для рівнянь (6) математичної моделі задано нульовою на граничному інтервалі ( $b = 0$ ) зі сторони суцільної зони металу, що не стискається. В іншому граничному інтервалі ( $b = b_\Gamma$ ), що рухається з невідомою заздалегідь швидкістю, задана гранична умова за тиском  $P$ , який створює поршень

$$v(0, t) = 0, \quad p(b_\Gamma, t) = P. \quad (24)$$

Аналогічно, за умови симетрії на осі та з урахуванням того, що питома теплопровідність діелектричної стінки є набагато меншою за питому теплопровідність плазми, граничні умови для рівнянь (7), (8) визначаються, як

$$W(0, t) = 0, \quad W(r_\Gamma, t) = 0. \quad (25)$$

Таким чином, система рівнянь (4) – (25) є математичною моделлю розрахунку просторово-часових процесів комутації в об'ємі саморегенеративного запобіжника.

Вирішення рівнянь (4) – (25) виконано кінцево-різницевим методом роздільних прогонів на основі застосування повністю консервативних різницевих схем [8]. Результати тестування магнітогідродинамічної моделі в режимі імпульсного введення енергії в середовище з високою питомою електропровідністю на відповідність реальним електрофізичним процесам наведено в роботах [7, 13].

Моделювалися процеси струмообмеження в контурі (рис. 4) зі зміною напругою 220 В і параметрами схеми заміщення:  $R = 1 \Omega$ ,  $L = 10^{-4} \text{ Гн}$ ,  $R_1 = 0,1 \Omega$ . Активна зона лужного металу мала довжину  $l = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  і радіус  $r_k = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . За такими розмірами початковий опір активної натрієвої зони дорівнював  $R_2 = 2 \cdot 10^{-4} \Omega$ . В нормальному режимі роботи амплітуда струму в навантаженні  $R$  не перевищує  $I_s = 310 \text{ A}$ . Режим короткого замикання моделювався раптовою зміною опору  $R$  від 1 Ом до 0,01 Ом в будь-який момент часу, наприклад, в момент  $t = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  від початку періоду коливання напруги. Результати чисельного моделювання комутаційних процесів зображені на рис. 5.

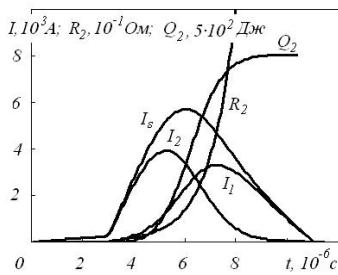


Рис. 5. Результати чисельного моделювання комутації струму в схемі струмообмеження:  $I_s$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  – струм вимикача, резистора і саморегенеративного запобіжника відповідно;  $R_2$  – залежність від часу опору лужного металу;  $Q_2$  – енергія, введена в активну зону лужного металу за час обмеження струму

Згідно розрахунку в процесі протікання струму  $I_2$  через саморегенеративний запобіжник в об'ємі лужного металу виділяється джоулеве тепло, його температура підвищується, зменшується питома електропровідність і збільшується опір. Зростання опору  $R_2$  у часі з близької до лінійної залежності змінюється на експоненційну, коли температура лужного металу досягає температури кипіння. Переключення струму із запобіжника в резистор струмообмеження завершується за шість мілісекунд. За час комутації в запобіжнику виділяється енергія  $Q_2 = 4 \cdot 10^2$  Дж, а за рахунок пароутворення опір активної зони лужного металу зростає більш, ніж в дві тисячі разів. Далі струм в лінії, обмежений опором резистора  $R_2$  до значення значно меншого, ніж амплітудне значення струму короткого замикання, вимикається автоматичним вимикачем (рис. 1,а).

Слід зазначити, що максимальне значення струму  $I_s$ , що тече через вимикач в даному разі дорівнює  $6 \cdot 10^3$  А. В режимі без обмеження струму саморегенеративним запобіжником амплітуда струму для заданих параметрів режиму короткого замикання досягає значення  $2,2 \cdot 10^4$  А.

## ВИСНОВКИ

На основі аналізу процесів комутації струму саморегенеративним запобіжником, що функціонує на основі втрати електропровідності за рахунок зміни фазового стану лужного металу, розроблено математичну модель, яка в одновимірному просторово-часовому наближенні враховує взаємодію електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів в об'ємі комутаційного апарату. Чисельний аналіз переключення струму вірно відбиває реальні комутаційні процеси в схемі струмообмеження і дозволяє обрати конструктивні параметри саморегенеративного запобіжника та визначити час комутації.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Алиев И.И., Абрамов М.Б. Электрические аппараты. Справочник. – М.: Радиософ, 2010. – 256 с.
- Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 159 с.
- Itoh T., Miyamoto T., Takano N. Permanent Power Fuse. – Paper 70 CP601 PWR. (IEEE Summer Power Meeting) 1970. – P. 78-86.
- Джезбицки С., Вальчук Е. Токоограничивающие выключатели переменного тока. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 115 с.
- Ильин В.П. Численные методы решения задач электродинамики. – М.: Наука, 1985. – 334 с.
- Vovk I.T., Dubovenko K.V. A New Electrode Unit for Operating in Liquids with High Specific Conductivity // 11<sup>th</sup> IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. (Baltimore, Ma, USA). – 1997. – Vol. 1. – P.559-564.
- Shcherba A.A., Dubovenko K.V. Kompaktnye vysoko-vol'tnye elektrorazryadnye sistemy. – К.: Naukova dumka, 2008. – 324 s.
- Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
- Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В., Шарипджанов И.И. Построение уравнения состояния химических соединений. – М., 1976. – Препр. / АН СССР. Ин-т прикладной математики; № 43. – 63 с.
- Быстров П.М., Каган Д.Н., Кречетова Г.А. и др. Жидкометаллические теплоносители тепловых труб и энергетических установок. Под ред. В.А. Кириллина. М.: Наука, 1988.
- Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Под ред. П.Л. Кириллова. – М.: ИздАТ. 2007. – 194 с.
- Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А., Токий Е.Е. Теплофизические свойства щелочных металлов. Справочник. Под. ред. В.А. Кириллина. – М.: Изд-во стандартов, 1970. – 206 с.
- Dubovenko K.V., Chemerys V.T. Performance Simulation of Pulsed Power Supply System for Electrothermal Launcher // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – №1. – С. 328-333.

**Bibliography (transliterated):** 1. Aliev I.I., Abramov M.B. 'Elektricheskie apparaty. Spravochnik. - M.: Radiosoft, 2010. - 256 s. 2. Klimenko B.V. Forsirovannye 'elektromagnitnye sistemy. - M.: 'Energoatomizdat, 1989. - 159 s. 3. Itoh T., Miyamoto T., Takano N. Permanent Power Fuse. - Paper 70 CP601 PWR. (IEEE Summer Power Meeting) 1970. - P. 78-86. 4. Dzhezbicki S., Val'chuk E. Tokoogranichivayuschie vyluchhateli peremennogo toka. - L.: 'Energoizdat, 1982. - 115 s. 5. Il'in V.P. Chislennyye metody resheniya zadach 'elektrofiziki'. - M.: Nauka, 1985. - 334 s. 6. Vovk I.T., Dubovenko K.V. A New Electrode Unit for Operating in Liquids with High Specific Conductivity // 11<sup>th</sup> IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. (Baltimore, Ma, USA). - 1997. - Vol. 1. - P.559-564. 7. Scherba A.A., Dubovenko K.V. Kompaktnye vysoko-vol'tnye elektrorazryadnye sistemy. - К.: Naukova dumka, 2008. - 324 s. 8. Samarskij A.A., Popov Yu.P. Raznostnye metody resheniya zadach gazovoj dinamiki. - M.: Nauka, 1980. - 352 s. 9. Kalitkin N.N., Kuz'mina L.V., Sharipdzhanyov I.I. Postroenie uravneniya sostoyaniya himicheskikh soedinenij. - M., 1976. - Prepr. / AN SSSR. In-t prikladnoj matematiki; № 43. - 63 s. 10. Bystrov P.M., Kagan D.N., Krechetova G.A. i dr. Zhidkometallicheskie teplonositeli teplovyyh trub i 'energeticheskikh ustavok. Pod red. V.A. Kirillina. M.: Nauka, 1988. 11. Teplofizicheskie svojstva materialov yadernoj tekhniki. Pod red. P.L. Kirillova. - M.: IzdAT. 2007. - 194 s. 12. Shpil'rajn E. E., Yakimovich K.A., Tockij E.E. Teplofizicheskie svojstva schelochnyh metallov. Spravochnik. Pod. red. V.A. Kirillina. - M.: Izd-vo standartov, 1970. - 206 s. 13. Dubovenko K.V., Chemerys V.T. Performance Simulation of Pulsed Power Supply System for Electrothermal Launcher // IEEE Transactions on Magnetics. - 1999. - №1. - S. 328-333.

Надійшла 02.02.2012

Дубовенко Константин Вікторович, д.т.н.  
Миколаївський державний аграрний університет  
кафедра електротехнологій і електропостачання  
54010, Миколаїв, вул. Паризької Комуни, 9  
тел.: (0512) 341082, e-mail: dubovenko2010@gmail.com

Зотов Олександр Родіонович  
інженер когенераційної установки  
ПАТ "Вознесенське шкіряне об'єднання"  
56500, Вознесенськ, вул. Жовтневої революції, 287  
тел. (0516) 321573, e-mail: sapsan911@gmail.com

**Dubovenko K.V., Zotov O.R.**  
**Numerical simulation of a self-regenerative fuse operation with a short commutation period.**  
On the basis of electric field distribution analysis in the volume of a self-regenerative fuse, the active zone of the alkaline metal, which changes its phase state under transition from its condensed state to vapor, is determined. These data are further applied to developing a set of equations for numerical analysis of the current limiting. Temporal dependences for the fuse and the switch currents, the alkaline metal resistance, and commutation power loss have been obtained.

**Key words – self-regenerative fuse, current limiting, numerical simulation.**

## ГЕНЕРАТОРНІ СТРУМИ ПІД ЧАС КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ В ПРИСТРОЯХ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ

*В статті представлена математичну модель системи електричної тяги постійного струму залізниць України в режимі короткого замикання в тяговій мережі, і як наслідок процес виникнення генераторних струмів в електрорухомому складі. Для боротьби з генераторними струмами та їх негативними наслідками, автором запропоновано використання на рухомому складі автоматів гашення поля.*

*В статье представлена математическая модель системы электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины в режиме короткого замыкания в тяговой сети, и как следствие процесс возникновения генераторных токов в электроподвижном составе. Для борьбы с генераторными токами и их негативными последствиями, автором предложено использовать на подвижном составе автоматов гашения поля.*

### ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДПОСИЛКИ І ПРИЧИНІ ВИНИКНЕННЯ ГЕНЕРАТОРНИХ СТРУМІВ

У порівнянні з тяговими струмами генераторні струми, що виникають в елементах системи електричної тяги, є більш рідкісним явищем. Насамперед, вони створюються спеціальним режимом рекуперативного гальмування і можуть виникати в аварійних режимах. Генераторні струми рекуперації в даній статті автор не аналізує, далі мова буде йти про аварійні генераторні режими.

Вплив аварійних генераторних струмів на тягову мережу (ТМ) найбільш повно приведена в роботах [1, 2]. Однак в цих дослідженнях не отримано і тому не проаналізовано (при поясненні) механізму виникнення струмів. По-друге, дослідження виконано для російських залізниць і для перших електровозів (ВЛ19). Крім цього, в [1] дещо неточні висновки відносно термінів часу, а також імовірності переходу тягових електродвигунів (ТЕД) в генераторний режим, що обумовлено, певно, умовами виконання в цій роботі дослідів при загальмованих ТЕД і односторонньому живлені контактної мережі (КМ). Нарешті, в обох роботах не запропоновано способи переривання виникнення генераторних струмів.

Для аналізу механізму виникнення генераторних струмів розглянемо, наприклад, електричну схему заміщення групи ТЕД електровоза постійного струму ДЕ1 (рис. 1).

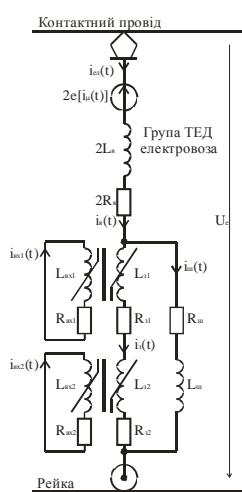


Рис. 1. Схема заміщення групи тягових двигунів

Для неї у випадку коли ТЕД працюють у режимі двигунів (при повному збудженні) справедливим є рівняння:

$$2(R_{\text{я}} + R_3)i_{\text{e}}(t) + 2L_{\text{я}} \frac{di_{\text{e}}}{dt} + 2 \cdot 2p\sigma_3 w_3 \frac{d\Phi}{dt} + 2e(t) = U_{\text{e}}, \quad (1)$$

де  $R_{\text{я}}$ ,  $R_3$  – активні опори обмоток якоря і збудження (ОЗ);  $L_{\text{я}}$  – індуктивність ОЗ;  $e(t)$  – проти-е.р.с. обмотки якоря;  $2 \cdot 2p\sigma_3 w_3 \frac{d\Phi}{dt}$  – е.р.с. самоіндукції ОЗ;

Під час певних перехідних режимів напруга на струмоприймачі електровоза  $U_{\text{e}}$  та його струм  $i_{\text{e}}$  змінюються в часі, що призводить до порушення рівноваги роботи й тим самим переходу ТЕД у режим генерації:

$$e_{\text{r}}(t) = 0,5 \cdot U_{\text{e}}(t) + (R_{\text{я}} + R_3) \cdot i_{\text{r}}(t) + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{e}}}{dt} + 2 \cdot 2p\sigma_3 w_3 \frac{d\Phi}{dt} + 2 \cdot e(t). \quad (2)$$

Із (2) випливає, що струм в електровозі, а отже і в ТМ змінить знак на від'ємний, тобто стане генераторним, у випадку, коли генераторна е.р.с.  $e_{\text{r}}(t)$  перевищить напругу на струмоприймачі  $U_{\text{e}}$  електровоза, тобто при умові:

$$U_{\text{e}} < e_{\text{r}}(t). \quad (3)$$

Отже, якщо в нормальному тяговому режимі  $U_{\text{e}} > e_{\text{r}}(t)$ , то щоб виконалась умова (3), ѹ тим самим здійсниться генераторний режим потрібно різке зменшення за якихось причин напруги  $U_{\text{e}}$  або збільшення  $e_{\text{r}}(t)$ . Проаналізуємо ці можливі причини.

Напруга на струмоприймачі  $U_{\text{e}}$  може зменшитись за таких причин. Перша (без втрати контакту струмоприймача з контактним проводом) – в результаті звичайних експлуатаційних технологічних коливань. Як показують статистичні дослідження [3, 4], такі коливання спостерігаються в межах 2230...3990 В для електровозів ВЛ8 і ДЕ1. Загалом ці коливання відбуваються з невеликою частотою, десь до 1 Гц. Однак під час цих коливань можливі і стрибкоподібні (попштовхом) зміни напруги  $U_{\text{e}}$ . Наприклад, на ділянках Придніпровської залізниці для електровозів ДЕ1 з імовірністю 0,8 спостерігаються поштовхи-спади напруги  $\Delta U_{\text{e}}$  від 209 до 861 В [5]. Певно, при таких не-передбачено різких спадах напруги не виключеним є генераторний режим електровоза в ТМ.

Напруга на струмоприймачі  $U_{\text{e}}$  може зменшитись, причому різко, у режимі КЗ в ТМ, що випливає із такого простого рівняння:

$$U_{\text{e}} = E_{\text{пп}} - i_{\text{k}} \cdot R_{\text{тм}} = E_{\text{пп}} - i_{\text{k}} \cdot R_{0\text{тт}} \cdot l, \quad (4)$$

де  $E_{\text{пп}}$  – е.р.с. тягової підстанції (ТП);  $i_{\text{k}}$  – струм короткого замикання.

ткого замикання (КЗ) в ТМ;  $R_{0\text{TM}}$  – питомий опір ТМ ( $\Omega/\text{мм}$ );  $l$  – відстань, на якій знаходиться ЕРС (електропровод) від місця КЗ.

Із (4) випливає, що зі збільшенням  $l$  збільшується спад напруги в проводах ТМ, зокрема на ділянках "ек" (рис. 2), й тим самим зменшується  $U_e$ . Тобто,  $U_e$  в режимі КЗ залежить від місця розташування ЕРС і схеми живлення ТМ. І зрозуміло, що "потрібне" для генераторного режиму  $U_e$  буде не при кожному КЗ, а лише у випадку достатньої величини спаду напруги в ТМ, тобто, достатньому значенню  $i_k R_{0\text{TM}} l$ .

Вище розглянуто причини появи одного фактору умови (3), а саме, зменшення  $U_e$ . Другим фактором цієї умови є значення і характер зміни (збільшення)  $e_r(t)$ , яка, як відомо, визначається за виразом:

$$e_r(t) = C_e \cdot n \cdot \Phi(t), \quad (5)$$

де  $C_e$  – постійна двигуна;  $n$  – кількість обертів якоря (частота обертання);  $\Phi(t)$  – основний магнітний потік.

Величина "n" за термін часу переходного процесу (0,2...0,3 с) не змінюється і тому характер зміни  $e_r(t)$  визначається основним потоком  $\Phi(t)$ , на який, як відомо, суттєвий демпфіруючий вплив чинять вихрові

струми, що виникають в суцільних магнітопроводах остатів і головних полюсів ТЕД електровозів. Крім цього, у режимі послаблення збудження на характер зміни  $\Phi(t)$  впливає і струм у вітці шунтування ТЕД.

Як зазначалось, найбільш розповсюдженім і небезпечним аварійним режимом у системі електротяги є режим КЗ в ТМ, тому далі методом математичного моделювання дослідимо закономірності виникнення і проаналізуємо результати чисельних розрахунків генераторних струмів у режимах КЗ. Як зазначалось в [6], процеси, що виникають при переході ТЕД в генераторний режим в момент КЗ в ТМ, достатньо складні і практично мало досліджени. І тому в публікаціях наведено лише орієнтовно характеристи зміни напруги на струмоприймачі, фідерні струми, але інші величини не вивчались.

Насамперед треба відзначити, що режим КЗ в ТМ при наявності ЕРС на фідерній зоні є найбільш тяжким і складним режимом як для ТМ так і для ЕРС.

Значний термін часу ведення поїзда здійснюється при "C"-з'єднанні ТЕД. Тому розрахуємо і проаналізуємо виникнення генераторних струмів якраз на цьому з'єднанні ТЕД електровоза ДЕ1.

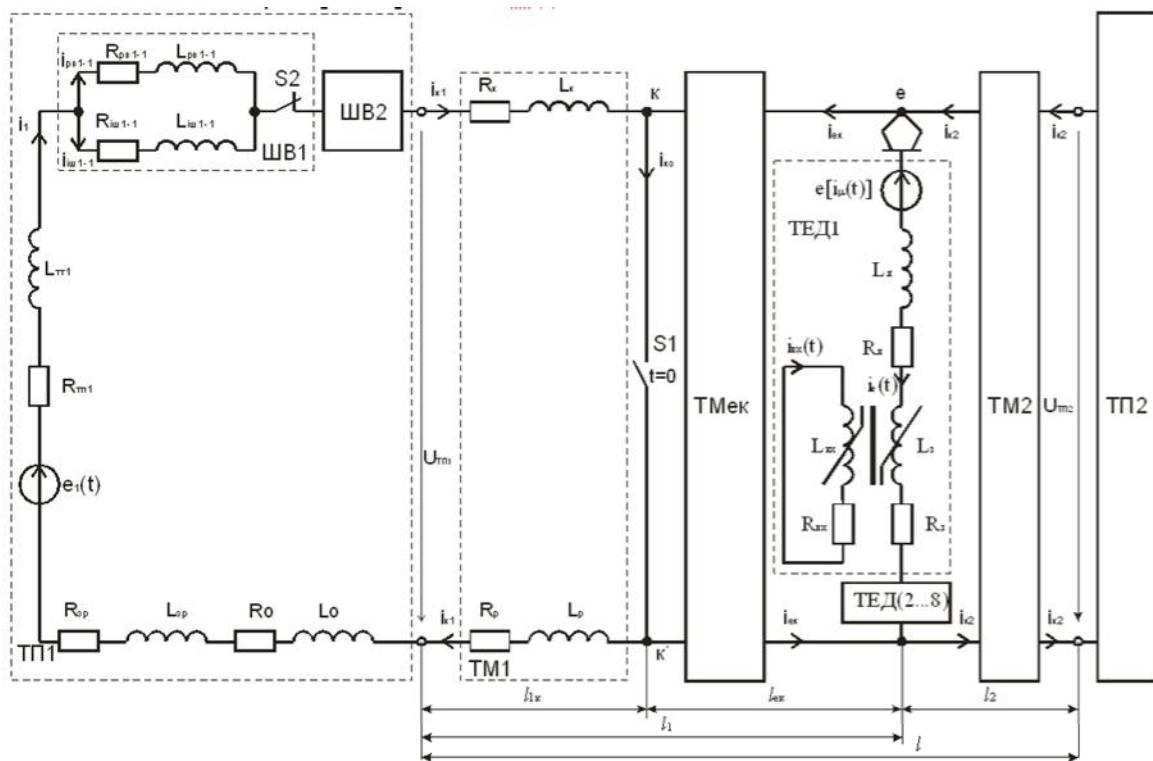


Рис. 2. Схема заміщення системи електричної тяги в режимі короткого замикання

#### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Загальна математична модель режиму КЗ в ТМ згідно рис. 2 являє собою таку систему рівнянь:

$$\begin{aligned} & (R_{\text{TT}1} + R_{3\text{p}1} + R_{\text{k}1} + R_{\text{p}1} + R_{\text{o}1}) \cdot i_1 + \\ & + (L_{\text{TT}1} + L_{3\text{p}1} + L_{\text{k}1} + L_{\text{p}1} + L_{\text{o}1}) \cdot \frac{di_1}{dt} + \\ & R_{\text{i}\text{ш}1\_1} \cdot i_{\text{i}\text{ш}1\_1} + L_{\text{i}\text{ш}1\_1} \frac{di_{\text{i}\text{ш}1\_1}}{dt} + R_{\text{i}\text{ш}1\_2} \cdot i_{\text{i}\text{ш}1\_2} + \\ & + L_{\text{i}\text{ш}1\_2} \frac{di_{\text{i}\text{ш}1\_2}}{dt} = e_1(t); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & (R_{\text{TT}2} + R_{3\text{p}2} + R_{\text{k}2} + R_{\text{p}2} + R_{\text{o}2}) \cdot i_2 + \\ & + (L_{\text{TT}2} + L_{3\text{p}2} + L_{\text{k}2} + L_{\text{p}2} + L_{\text{o}2}) \cdot \frac{di_2}{dt} + \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & R_{\text{i}\text{ш}2\_1} \cdot i_{\text{i}\text{ш}2\_1} + L_{\text{i}\text{ш}2\_1} \frac{di_{\text{i}\text{ш}2\_1}}{dt} + R_{\text{i}\text{ш}2\_2} \cdot i_{\text{i}\text{ш}2\_2} + \\ & + L_{\text{i}\text{ш}2\_2} \frac{di_{\text{i}\text{ш}2\_2}}{dt} + (R_{\text{kek}} + R_{\text{pek}}) \cdot i_{\text{ek}} + L_{\text{kek}} \frac{di_{\text{ek}}}{dt} = e_2(t) \\ & (R_{\text{kek}} + R_{\text{pek}}) \cdot i_{\text{ek}} + L_{\text{kek}} \frac{di_{\text{ek}}}{dt} + (R_{\text{я}} + R_3) \cdot i_{\text{e}} + 8L_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{e}}}{dt} + \end{aligned} \quad (8)$$

$$+ 2 \cdot 2 p \sigma_3 w_3 \frac{d}{dt} \left( \sum_{k=1}^8 \Phi_k \right) = C_e \cdot \omega \cdot \sum_{k=1}^8 \Phi_k$$

$$i_{\text{я}} - i_1 - i_2 = 0 \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{pbv1\_1}} \cdot i_{\text{pbv1\_1}} + L_{\text{pbv1\_1}} \frac{di_{\text{pbv1\_1}}}{dt} - R_{\text{iш1\_1}} \cdot i_{\text{iш1\_1}} - \\ - L_{\text{iш1\_1}} \frac{di_{\text{iш1\_1}}}{dt} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{pbv1\_2}} \cdot i_{\text{pbv1\_2}} + L_{\text{pbv1\_2}} \frac{di_{\text{pbv1\_2}}}{dt} - R_{\text{iш1\_2}} \cdot i_{\text{iш1\_2}} - \\ - L_{\text{iш1\_2}} \frac{di_{\text{iш1\_2}}}{dt} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{pbv2\_1}} \cdot i_{\text{pbv2\_1}} + L_{\text{pbv2\_1}} \frac{di_{\text{pbv2\_1}}}{dt} - R_{\text{iш2\_1}} \cdot i_{\text{iш2\_1}} - \\ - L_{\text{iш2\_1}} \frac{di_{\text{iш2\_1}}}{dt} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{pbv2\_2}} \cdot i_{\text{pbv2\_2}} + L_{\text{pbv2\_2}} \frac{di_{\text{pbv2\_2}}}{dt} - R_{\text{iш2\_2}} \cdot i_{\text{iш2\_2}} - \\ - L_{\text{iш2\_2}} \frac{di_{\text{iш2\_2}}}{dt} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{\text{я}} - i_{\mu 1} - i_{\text{bx1}} = 0 \\ \dots \\ i_{\text{я}} - i_{\mu 8} - i_{\text{bx8}} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} i_1 - i_{\text{pbv1\_1}} - i_{\text{iш1\_1}} = 0 \\ i_1 - i_{\text{pbv1\_2}} - i_{\text{iш1\_2}} = 0 \\ i_2 - i_{\text{pbv2\_1}} - i_{\text{iш2\_1}} = 0 \\ i_2 - i_{\text{pbv2\_2}} - i_{\text{iш2\_2}} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{bx\_3p}} \cdot i_{\text{bx1}} + \sigma_3 w_3 \frac{d\Phi_1}{dt} = 0 \\ \dots \\ R_{\text{bx\_3p}} \cdot i_{\text{bx8}} + \sigma_3 w_3 \frac{d\Phi_8}{dt} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{\mu 1} = f(\Phi_1(t)) \\ \dots \\ i_{\mu 8} = f(\Phi_8(t)) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Чисельні розрахунки виконано для таких режимів і припущення: живлення фідерних зон двостороннє; працюючий на ділянці електровоз серії ДЕ1; схеми з'єднання ТЕД "С"; збудження ТЕД повне; відстані між ТП1 і ТП2 рівній  $l=20$  км; відстань від точки КЗ до ТП1  $l_{\text{ек}}=0,5$  км; відстань від ЕРС до точки КЗ змінюється  $l_{\text{ек}}=0,5; 9,5; 18,5$  км.

Значення необхідних для розрахунку параметрів приведені в роботах автора [7...11].

#### РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ

У розглядуваному режимі КЗ складова струму ( $i_{\text{кз}}=0$ ) і тому живлення ЕРС частково переходить на фідер підстанції ТП2. Одночасно, струм КЗ, тобто в "закоротці"  $i_{\text{кз}}$  і фідерний струм  $i_1$  від ТП1 різко зростають (рис. 3 і 4, при різній довжині  $l_{\text{ек}}$ : 1 – 0,5 км; 2 – 9,5 км; 3 – 18,5 км). Струм  $i_1(t)$  досягає своєї ставки ( $I_{\text{ly}}=3000$  А) і ШВ на ТП1 через 0,022 с після початку КЗ починає вимикатись і через 0,033 с повністю вимикається (рис. 3).

При цьому, як виливач із рис. 3, зазначене вимикання ШВ ТП1 відбувається при розташуванні ЕРС у

будь-якій точці фідерної зони, тобто, при будь-якій відстані між ЕРС і точкою КЗ.

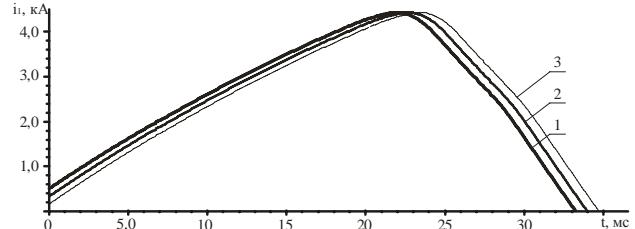


Рис. 3. Часові залежності струму тягової підстанції ТП1, при різній довжині від точки КЗ до ЕРС  $l_{\text{ек}}$  [км]: 1 – 0,5; 2 – 9,5; 3 – 18,5

Характер зміни струму КЗ, тобто  $i_{\text{кз}}$ , в залежності від відстані  $l_{\text{ек}}$  однаковий: спочатку, в період вимикання ШВ ТП1, він різко зростає до 6200...6600 А, потім також різко зменшується до 2000...2500 А і встановлюється в новому усталеному значенні 2500...3000 А. Тривалість такого перехідного процесу складає 0,3...0,35 с (рис. 4).

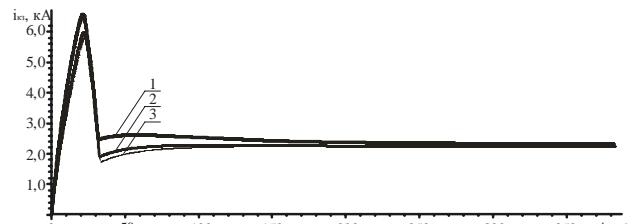


Рис. 4. Часові залежності струму короткого замикання, 3 для умови рис. 3

Одночасно, фідерний струм  $i_2$  спочатку лінійно зі швидкістю (3...3,5)-104 А/с, а потім експоненціально зростає до 2330 А при  $l_{\text{ек}}=0,5$  км, а при русі поїзда до 2400 А – 9,5 км і 2600 А – 18,5 км (рис. 5). Приріст максимального значення цього струму склав відповідно 2270, 2176 і 2255 А, що може бути використано при розрахунках струму установки фідера і для правильного вибору параметрів датчика релейного захисту. І як виливач із рис. 5, при розглянутих відстанях  $l_{\text{ек}}$  фідерний струм  $i_2$  не досягає установки 3000 А і тому ШВ ТП2 не вимикається і ТП2 продовжує живити ЕРС і КЗ.

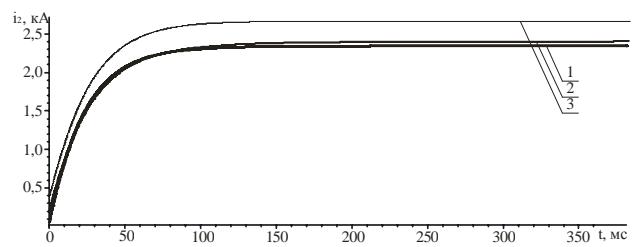


Рис. 5. Часові залежності струму тягової підстанції ТП2, для умови рис. 3

Також одночасно з вимиканням ШВ ТП1 і зростанням  $i_2$  збільшується струм  $i_{\text{ек}}$  між ЕРС і точкою КЗ (рис. 6), а, отже, і спад напруги  $U_{\text{ек}}$  на цій же ділянці. Однак напруга на струмоприймачі  $U_e$  зменшується: спочатку кідком (в момент КЗ), а потім повільно (рис. 7), досягаючи свого усталено значення, обумовленого напругою на працюючій ТП2 і рівного спаду  $U_{\text{ек}}$ : ~100 В при  $l_{\text{ек}}=0,5$  км; 1200 В – 9,5 км і 2400 В –

18,5 км. Різке зменшення напруги на струмоприймачі призводить також до різкого початкового (в термін вимикання ШВ ТП1) зменшення тягового струму електровоза  $i_e$  (рис. 8). Зменшується також основний магнітний потік  $\Phi(t)$  ТЕД ЕРС (рис. 9), а також їх проти е.р.с. (рис. 10), яка залежить, як відомо, від  $\Phi(t)$ . Однак  $\Phi(t)$  знижується значно повільніше, ніж струм електровоза  $i_e$ , що пов'язано з демпфіруючою дією магнітного потоку, створеного вихровими струмами в магнітопроводі ТЕД (рис. 11) достатньо великих максимальних значень (230...1080 А) в період вимикання ШВ ТП1. Зрозуміло і очевидно із рис. 10, що і проти е.р.с.  $e(t)$  ТЕД електровоза знижується повільніше, ніж напруга на струмоприймачі  $U_e$  (рис. 7), що дорівнює спаду  $U_{ek}$ . Тому з часом, після вимикання ШВ ТП1 (і при  $i_e=0$ )  $U_e$  вирівнюється з  $e(t)$ , а потім стає меншою, ніж  $e(t)$ . В результаті ТЕД переходить в генераторний режим (рис. 8), максимальне значення струму якого  $i_g$  при  $l_{ek}=0,5$  км досягає 760 А. Отже, імовірність генераторного режиму визначається величиною спаду напруги в ТМ  $U_{ek}$  на дільниці ек. Тобто, при великій відстані  $l_{ek}$  генераторний струм може не виникнути, як це спостерігається на рис. 8 (крива 3), що побудована для  $l_{ek}=18,5$  км, а найбільш імовірно виникнення генератором режиму у ЕРС, що знаходиться близьче до КЗ.

Генераторний струм у подальшому, з часом переходного процесу, після характерного сплеску (кідка) починає повільне експоненціальне загасання до певного усталеного режиму, що обумовлено таким же характером зменшенням  $\Phi(t)$ , а, отже і проти е.р.с. (рис. 10).

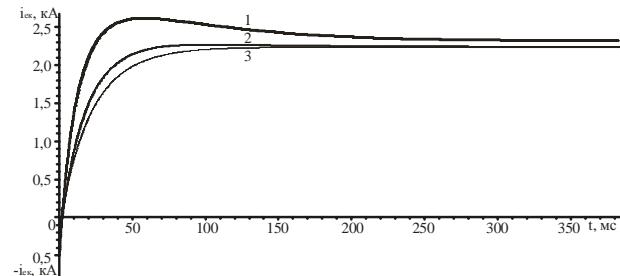


Рис. 6. Часові залежності струму на ділянці від ЕРС до точки КЗ, для умови рис. 3

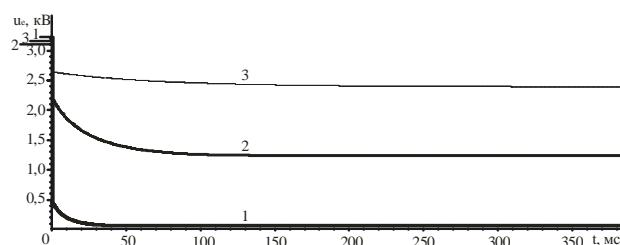


Рис. 7. Часові залежності напруги на струмоприймачі ЕРС, для умови рис. 3

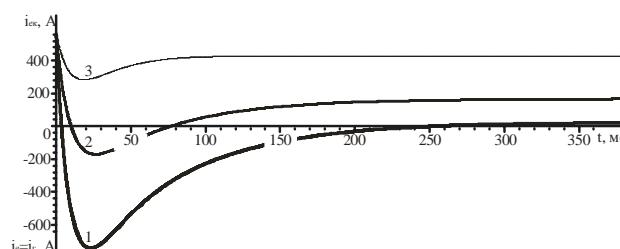


Рис. 8. Часові залежності струму ЕРС, для умови рис. 3

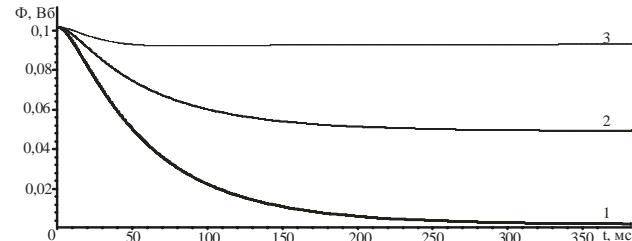


Рис. 9. Часові залежності основного магнітного потоку ТЕД ЕРС, для умови рис. 3

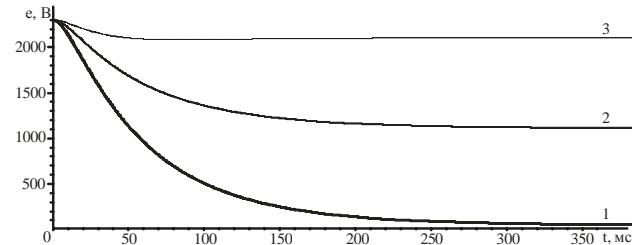


Рис. 10. Часові залежності проти е.р.с ТЕД ЕРС, для умови рис. 3

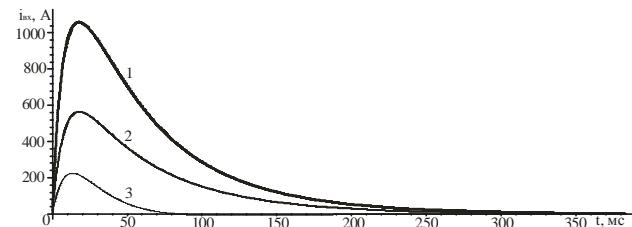


Рис. 11. Часові залежності вихрових струмів ТЕД ЕРС, для умови рис. 3

Тривалість сплеску генераторного струму співрозмірна з терміном часу вимикання струму  $i_{el}$  ШВ ТП1 і складає 0,035 с (рис. 8). В той же час ЕРС переходить в генераторний режим через 5...20 мс після початку КЗ, а весь переходний процес зміни струму  $i_e(t)$  триває 0,075...0,25 с. В той же час, як відомо, термін часу спрацьовування релейного захисту системи тягового електропостачання не повинен перевищувати 0,08 с [12].

#### ГАШЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Електрорухомий склад в генераторному режимі являє собою джерело електроенергії (джерело струму), що підживлює місце КЗ. При цьому енергія у місці КЗ, яка створюється одним-двома генеруючими електровозами, досягає 300...600 Ас, а амплітуда струмів генерації – до 1500 А [1]. В той же час для перепалу провода МФ-100 при струмах вище 400 А потрібно всього 250 Ас. Тобто, струми генерації являються серйозною причиною термічних пошкоджень КМ. Крім цього, вони викликають пошкодження також іскрових проміжків у колі заземлення опор КМ. Часті також випадки пошкодження апаратури на самому генератору чому ЕРС.

Зазначене вимагає розробки методів і засобів, які переривають або не допускають виникнення режиму генерації. Ці засоби і методи повинні базуватись, виходячи з основної причини, що обумовлює виникнення генераторного режиму, а саме на характер змінів часі основного магнітного потоку  $\Phi(t)$ , точніше на швидкості  $d\Phi/dt$ , яке значно менше швидкості зменшення напруги на струмоприймачі  $dU_e/dt$ . Тобто, потрібно пришвидшити процес загасання основного магнітного потоку. Для виконання

цієї функції можна застосовувати так звані автомати гашення поля (АГП), які набули широкого розповсюдження для захисту турбогенераторів на електростанціях. В роботі [13] виділено оптимальні умови гашення поля, які можна узагальнити наступними пунктами: термін час гашення поля мінімальний; напруга на обмотці збудження не повинна перевищувати гранично допустимого значення за умовою електричної міцності ізоляції.

У якості нелінійного резистивного елементу, призначено для розсіювання накопиченої енергії у вище-зазначених автоматах використовується коротка електрична дуга (2-3 мм). Проведені автором роботи [13] показали, що падіння напруги на короткій електричній дузі між металевими електродами зберігає практично сталу величину, не дивлячись на зміну струму в широких межах до величини 24 кА. Автором було зазначено, що схема гашення поля машин постійного струму є значно простішою, ніж поля синхронних машин, оскільки немає необхідності після гашення поля замикати обмотку збудження на шунтувачний опір.

Тривалість існування дуги в камері автомата при гашенні поля машини постійного струму незначна, а весь процес гашення поля вимірюється декількома десятками частками секунди.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Векслер, М.И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания [Текст] / М.И. Векслер. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.
2. Пупынин, В.Н. Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах: диссертация доктора технических наук [Текст] / В.Н. Пупынин. – М.: МИИТ, 1986. – 340 с.
3. Міщенко, Т.М. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприемнике первого украинского электровоза ДЭ1 [Текст] / Т.М. Міщенко, П.Е. Михаліченко, М.О. Костін// Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 2. – С. 43-45.
4. Саблин О.И. Повышение эффективности электропотребления электроподвижного состава постоянного тока [Текст] / О.И. Саблин: Дис. канд. техн. наук – Д.:2009. – 190 с.
5. Мищенко Т.Н. Математическое моделирование влияния толчков случайной функции напряжения на токоприёмнике на переходные электромагнитные процессы в электровозе ДЭ1 [Текст] / Т.М. Міщенко // Вісник ДНУЗТ. – 2005. – Вип. 9. – С. 61-68.
6. Сердинов С.М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / С.М. Сердинов.– М.: Транспорт, 1985. – 301 с.
7. Михаліченко П.Е. Вплив режиму короткого замикання в тяговій мережі постійного струму на переходні електромагнітні процеси в електрорухому складі [Текст]/ П.Е. Михаліченко, Т.М. Міщенко, М.О. Костін// Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 4. – С. 63-66.
8. Михаліченко П.Є. Вплив пасивних фільтрів на електромагнітний стан в режимі короткого замикання в системі тягового електропостачання постійного струму [Текст] / П.Є. Михаліченко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2010. – Ч.2 – С. 195-200.
9. Костін Н.А. Математическое моделирование переходных аварийных электромагнитных процессов в системе електрическої тяги постійного тока. 1. Короткое замыкание без тяговой нагрузки [Текст]/ Н.А. Костін, П.Е. Михаліченко // Вісник ДІТа. – Випуск 17. – 2007. – С. 66-71.
10. Михаліченко П.С. Математичне моделювання переходних аварійних електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму. 2. Коротке замикання з електрорухомим складом [Текст] / П.Є. Михаліченко // Вісник ДІТа. – Випуск 32. – 2010. – С. 175-179.
11. Михаліченко П.Є. Математичне моделювання переходних аварійних електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму [Текст] / П.Є. Михаліченко, М.О. Костін// Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 2. – 2008. – С. 31-35.
12. ГОСТ 2585-81. Выключатели автоматические быстродействующие постоянного тока. Общие технические условия [Текст]. – М.: Госстандарт, 1981. – 29 с.
13. Брон О.Б. Автоматы гашения магнитного поля [Текст] / О.Б. Брон.– М, Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 137 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Veksler, M.I. Zaschita tyagovoju seti postoyannogo toka ot tokov korotkogo zamykaniya [Tekst] / M.I. Veksler. - M.: Transport, 1976. - 120 s. 2. Pupynin, V.N. Zaschita i otklyuchenie tyagovoju setej v avarijnyh rezhimah: dissertaciya doktora tehnicheskikh nauk [Tekst] / V.N. Pupynin. - M.: MIIT, 1986. - 340 s. 3. Mischenko, T.M. Veroyatnostnye karakteristiki sluchajnoj funkciy napryazheniya na tokopriemnike pervogo ukrainskogo `elektrovoza D'E1 [Tekst] / T.M. Mischenko, P.E. Mihalichenko, M.O. Kostin// Elektrotehnika i elektromehanika. - 2003. - № 2. - S. 43-45. 4. Sablin O.I. Povyshenie `effektivnosti `elektropotrebleniya `elektropodvzhnogo sostava postoyannogo toka [Tekst] / O.I. Sablin: Dis. kand. tehn. nauk - D.:2009. - 190 s. 5. Mischenko T.N. Matematicheskoe modelirovanie vliyanija tolchkov sluchajnoj funkciy napryazheniya na tokopriemnike na perehodnye `elektromagnitnye processy v `elektrovoze D'E1 [Tekst] / T.M. Mischenko // Visnik DNUZT. - 2005. - Vip. 9. - S. 61-68. 6. Serdinov S.M. Povyshenie nadezhnosti ustrojstv `elektrosnabzheniya `elektrificirovannyh zheleznyh dorog [Tekst] / S.M. Serdinov.- M: Transport, 1985. - 301 s. 7. Mihalichenko P.E. Vpliv rezhimu korotkogo zamikannya v tyagovij merezhi postojnogo strumu na perehidni elektromagnitni procesi v elektroruhomomu skladu [Tekst] / P.E. Mihalichenko, T.M. Mischenko, M.O. Kostin// Elektrotehnika i elektromehanika. - 2010. - № 4. - S. 63-66. 8. Mihalichenko P.E. Vpliv pasivnih fil'trov na elektromagnitnij stan v rezhimi korotkogo zamikannya v sistemi tyagovogo elektropostachannya postojnogo strumu [Tekst] / P.C. Mihalichenko // Tehnichna elektrodinamika. Tematichnij vypusk. Silova elektronika ta energoeffektivnist'. - 2010. - Ch.2 - C. 195-200. 9. Kostin N.A. Matematicheskoe modelirovanie perehodnyh avarijsyh `elektromagnitnyh processov v sisteme `elektricheskoy tyagi postoyannogo toka. 1. Korotkoe zamykaniye bez tyagovoju nagruzki [Tekst] / N.A. Kostin, P.E. Mihalichenko // Visnik DII Ta. - Vipusk 17. - 2007. - C. 66-71. 10. Mihalichenko P.E. Matematichne modeluyuvannia perehidnih avarijsnih elektromagnitnih procesiv v sistemi elektrichnoj tyagi postojnogo strumu. 2. Korotke zamikannya z elektroruhomim skladom [Tekst] / P.C. Mihalichenko // Visnik Dieta. - Vipusk 32. - 2010. - C. 175-179. 11. Mihalichenko P.E. Matematichne modeluyuvannia perehidnih avarijsnih elektromagnitnih procesiv v sistemi elektrichnoj tyagi postojnogo strumu [Tekst] / P.C. Mihalichenko, M.O. Kostin// Tehnichna elektrodinamika. Tematichnij vypusk. Problemi suchasnoj elektrotehniki. Chastina 2. - 2008. - S. 31-35. 12. GOST 2585-81. Vykl'yuchateli avtomaticheskie bystrodejstvuyuschie postoyannogo toka. Obschie tehnicheskie usloviya [Tekst]. – M.: Gosstandart, 1981. – 29 s. 13. Bron O.B. Avtomaty gasheniya magnitnogo polya [Tekst] / O.B. Bron. - M, L.: Gosenergoizdat, 1961. - 137 s.

Надійшла 17.10.2012

Михаліченко Павло Євгенович, к.т.н., доц.

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту ім. академіка В.А. Лазаряна

кафедра "ТОЕ"  
49010, Дніпропетровськ, вул. Академіка В.А. Лазаряна, 2  
тел.: (056) 3731537, e-mail: miha\_pavel@mail.ru

Mihalichenko P.E.

**Generator currents under short circuits in electric propulsion system equipment.**

In the article, a mathematical model of a DC electric propulsion system of the Ukrainian railways is introduced for a short-circuit condition in the traction network and, as its result, generator current initiation in electric rolling stock. For control of generator currents and their negative effect, the author suggests automatic field damper application on the rolling stock.

**Key words – mathematical modeling, contact system, electromagnetic processes, DC electric train, short circuit.**

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОАМОРТИЗАТОРА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

*Розроблена імітаційна модель електромеханічного перетворювача-амортизатора з лінійним кроковим двигуном, що дозволяє визначати миттєві значення його параметрів при різних режимах руху транспортного засобу. Задача розглядається на прикладі легкового автомобіля.*

*Разработана имитационная модель электромеханического преобразователя-амортизатора с линейным шаговым двигателем, что позволяет определять мгновенные значения его параметров при различных режимах движения транспортного средства. Задача рассматривается на примере легкового автомобиля.*

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение показателей эффективности транспортных средств не возможно без совершенствования конструкции, использования новых устройств и систем. Определение их параметров и характеристик целесообразно осуществлять с помощью современных математических моделей. В настоящее время на транспортных средствах начинают внедрять электрические устройства в частности электроамортизаторы, которые имеют отличительные признаки по сравнению с известными. Для получения интересуемой конструкторов информации требуются исследования, которые возможно выполнить теоретически путем моделирования процессов электромагнитной и механической систем. Этим вопросам при использовании такого вида устройств на транспортных средствах уделено не достаточно внимания.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для моделирования электромеханических преобразователей различных типов в настоящее время используются различные подходы. Первый из них – моделирование на основе уравнений обобщенного электромеханического преобразователя (ЭМП) энергии [1]. При создании таких моделей принимаются допущения о линейности магнитной системы, равномерности (гладкости) воздушного зазора. Эти допущения позволяют создавать модели систем с относительно слабыми нелинейностями. Учет локальных насыщений, таких как насыщение элементов магнитопровода, сложная геометрия магнитной системы, торцевые зоны магнитного поля, которые свойственны современным используемым ЭМП, при таком подходе невозможен. Поэтому широко используемые в настоящее время модели, созданные на этом принципе, имеют значительные погрешности. Однако главным достоинством их является возможность реализовать программно-ориентированные модели, позволяющие проводить расчеты динамических процессов достаточно оперативно, а с использованием современной техники в реальном масштабе времен. Это позволяет внедрять их в алгоритмы управления микропроцессорными системами автоматизированных приводов и устройств различных типов, в частности в подвесках автомобилей.

Вторым подходом является составления "цепно-полевой" модели ЭМП [2, 3]. При таком подходе авторами предлагается определять параметры ЭМП по результатам расчета магнитного поля. Обычно для этого предлагается использование численных методов, таких как метод конечных элементов. Полученные таким образом параметры магнитного поля (потокосцепления, собственные и взаимные индуктивно-

сти) идентифицируют математическую модель. Эти модели значительно точнее описывают процессы в ЭМП, однако машинное время для расчетов значительно увеличивается. Порядок таких моделей можно оценить в виде системы, в которой используется десятки, сотни тысяч нелинейных алгебраических уравнений, которые в свою очередь идентифицируют параметры 1 - 6 (для асинхронного двигателя нескольких десятков [3]) дифференциальных уравнений.

### ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разработать усовершенствованную математическую модель ЭМП транспортного средства (на примере для легкового автомобиля) на базе линейного двигателя, требующую минимальных ресурсов, затрат времени и провести имитационное моделирование нестационарных процессов, протекающих в нем при работе.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭМП

Предлагаемый подход позволит создать математическую модель ЭМП, порядок которой будет значительно ниже порядка модели предложенной в работах [2, 3], но при этом будут учитываться локальные насыщения и нелинейности ЭМП.

Выберем основные энергетические параметры ЭМП-амортизатора, которые представлены в табл. 1 и на рис. 1, 2. Здесь показаны:  $q_1, q_2, q_3$  – электрические заряды, двигающиеся в фазах 1, 2 и 3, соответственно;  $y$  – координата ротора;  $i_1, i_2, i_3$  – токи в фазах 1, 2 и 3, соответственно;  $v$  – скорость ротора;  $\psi_A, \psi_B, \psi_C$  – потокосцепления фаз;  $J$  – момент инерции ротора;  $e_1, e_2, e_3$  – напряжения, приложенные к фазам 1, 2 и 3, соответственно;  $F_C$  – сила сопротивления перемещения ротора ЭМП.

Таблица 1

Основные параметры ЭМП-амортизатора

Тип координаты	Электрическая	Электрическая	Электрическая	Механическая
$k$	1	2	3	4
$q_k$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$x$
$q'_k$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$v$
$p_k$	$\psi_A$	$\psi_B$	$\psi_C$	$m_{np}v$
$-f_k$	0	0	0	0
$Q_k$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$F_C$

Уравнение Лагранжа для электромеханической системы имеет следующий вид:

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \left( \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_k} \right) + Q_k = 0, \quad (1)$$

где  $L$  – силовая функция Лагранжа,  $F$  – релеева функция, описывающая потери в системе.

Рассмотрим построение математической модели

ЭМП-амортизатора в случае линейного ЭМП-амортизатора.

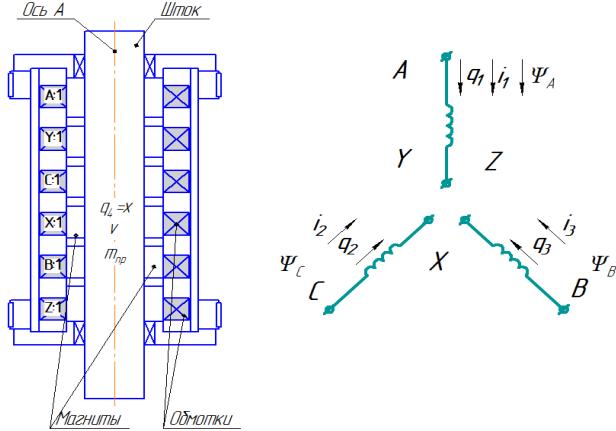


Рис. 1. Схема монтажа и включения элементов линейного ЭМП-амортизатора

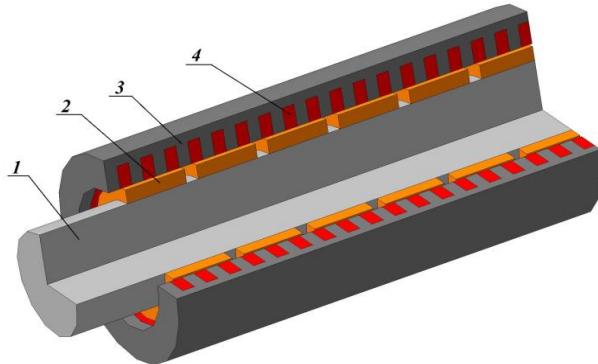


Рис. 2. 3D-модель конструкции ЭМП-амортизатора:  
1 – ротор, 2 – постоянные магниты, 3 – корпус, 4 – катушки фаз

Найдем консервативный лагранжиан, который определяется выражением:

$$L = \frac{1}{2} \cdot m_{np} v^2 + \int_0^i \Psi(i, x) di. \quad (2)$$

Определим релевую функцию рассеяния (потерь) в системе  $F$ , зависящую от скорости:

$$F = \frac{1}{2} r_1^2 + \frac{1}{2} r_2^2 + \frac{1}{2} r_3^2 + \frac{1}{2} \alpha v^2, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент трения во всех механизмах привода ЭМП.

После подстановки в уравнение Лагранжа найденных зависимостей получим после преобразований следующие уравнения динамической системы ЭМП-амортизатора и систему уравнений электрического баланса:

$$\begin{cases} e_1 - \frac{d\Psi'_A}{dt} - r_1 i_1 = 0 \\ e_2 - \frac{d\Psi'_B}{dt} - r_2 i_2 = 0 \\ e_3 - \frac{d\Psi'_C}{dt} - r_3 i_3 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$F_e - m_{np} \frac{dv}{dt} - \alpha v + F_c = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi'_A &= \left\{ \Psi_A + \frac{\partial(\int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 + \int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3)}{\partial i_1} \right\}; \\ \Psi'_B &= \left\{ \Psi_B + \frac{\partial(\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 + \int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3)}{\partial i_2} \right\}; \\ \Psi'_C &= \left\{ \Psi_C + \frac{\partial(\int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 + \int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2)}{\partial i_3} \right\}; \end{aligned}$$

$F_e$  – электромагнитная сила трехфазного ЭМП-амортизатора, определяемая выражением:

$$F_e = \frac{i_1}{\partial x} \frac{\partial \int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2}{\partial x} + \frac{i_2}{\partial x} \frac{\partial \int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3}{\partial x} + \frac{i_3}{\partial x} \frac{\partial \int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1}{\partial x}.$$

Решим модель (5) относительно производных токов (обобщенных скоростей) и получим для тока  $i_1$ :

$$di_1 = \begin{bmatrix} e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - r_1 i_1 \\ e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \\ e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \end{bmatrix} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} dt; \quad (6)$$

Для остальных токов –  $i_2, i_3$  выражения аналогичны.

Введём следующие обозначения:  $D$  – знаменатель в формуле (6), а  $D_A, D_B, D_C$  – числители в этой же формуле для соответствующих токов. Тогда математическая модель ЭМП-амортизатора имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{D_A}{D}, \frac{di_2}{dt} = \frac{D_B}{D}, \frac{di_3}{dt} = \frac{D_C}{D}; \\ F_e - \alpha v - F_c = m_{np} \frac{dv}{dt}; \\ v = \frac{dx}{dt}. \end{cases} \quad (7)$$

где  $F_c$  – приведенная сила сопротивления механизмов подвески.

Для идентификации параметров (7) необходимо установить зависимости между потокосцеплениями фаз  $\Psi_A$ ,  $\Psi_B$  и  $\Psi_C$  с одной стороны, обобщенными координатами и их производными с другой стороны. Для чего необходимо провести комплекс цифровых экспериментов и определить эти зависимости.

Для определения значений потокосцеплений предлагается проводить расчет магнитного поля ЭМП-амортизатора в двумерной постановке с использованием метода конечных элементов для плоскопараллельной задачи. По результатам анализа магнитного поля можно определить значения потокосцеплений фаз трехфазного ЭМП-амортизатора и значение электромагнитной силы. На рис. 3 представлена расчетная область магнитного поля в аксиально-симметричной постановки задачи, а на рис. 4 ее конечно-элементная сетка.

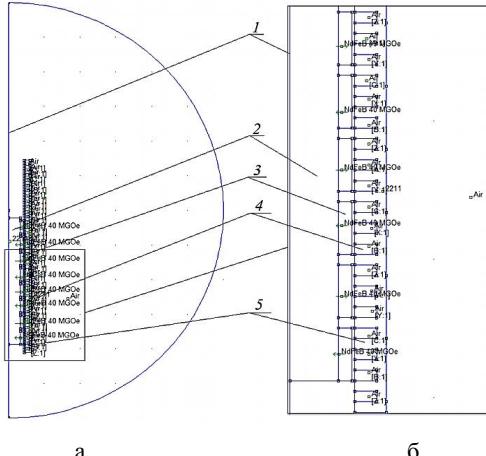


Рис. 3. Расчетная область Femm-модели ЭМП-амортизатора при расчете магнитного поля: а – полная расчетная область; б – увеличенный фрагмент расчетной области; 1 – ось симметрии; 2 – ротор; 3 – постоянные магниты; 4 – обмотки; 5 – статор

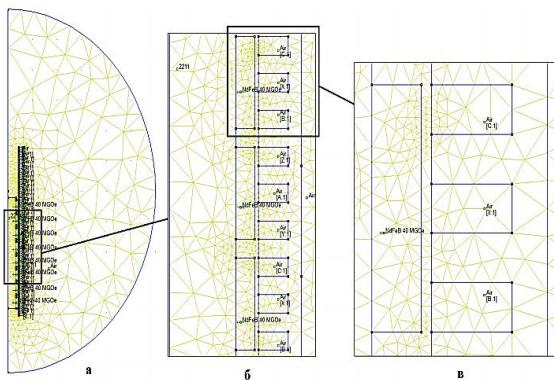


Рис. 4. Конечно-элементная сетка расчетной области Femm-модели ЭМП-амортизатора: а – полная расчетная область; б – распределение сетки по зубцам; в – распределение в зубцовой зоне

На каждом шаге решения задачи производился автоматический расчет электромагнитного поля линейного ЭМП (см. рис. 5), определялась величина тяговой силы и потокосцепления для текущих значений тока и зазора. Величина силы измерялась путем интегрирования по контуру якоря ЭМП, а значение потокосцепления – по поперечному сечению его обмоток. Для расчета магнитного поля предлагается использовать программ-

ный комплекс femm [4]. Результаты одного из расчетов магнитного поля приведены на рис. 5.

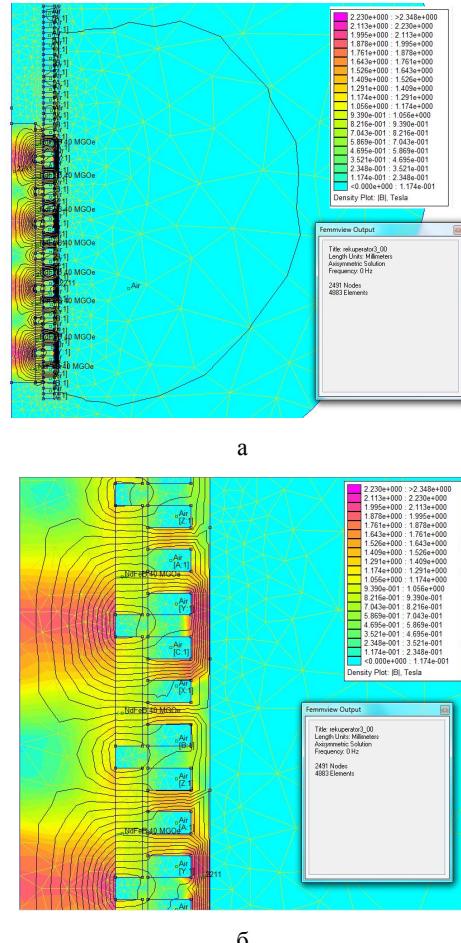


Рис. 5. Результаты расчета магнитного поля (а) и фрагмент картины магнитного поля в зубцовой зоне (б)

Для получения непрерывных зависимостей потокосцеплений (8) и электромагнитной силы (9) результаты цифрового моделирования необходимо аппроксимировать функциями вида:

$$\begin{aligned} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n aa_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right] \times \\ &\quad \times \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ab_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \\ &\quad \times \sin(\omega l x) + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ac_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k; \\ \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ba_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right] \times \\ &\quad \times \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n bb_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \\ &\quad \times \sin(\omega l x) + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n bc_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k; \\ \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ca_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right] \times \\ &\quad \times \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n cb_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \\ &\quad \times \sin(\omega l x) + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n cc_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k; \end{aligned} \quad (8)$$

$$F_e(i_1, i_2, i_3, x) = \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n m_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \times \right. \\ \times \cos(\omega l x) + \left. \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n m_{bijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \right] \times \\ \times \sin(\omega l x) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n m_{cijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k, \quad (9)$$

где  $a_{ijk}$ ,  $b_{ijk}$ ,  $c_{ijk}$ ,  $ba_{ijk}$ ,  $bc_{ijk}$ ,  $cc_{ijk}$  – коэффициенты полинома для фазы А, В и С, соответственно, определенные с использованием полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек;  $w$  – количество витков обмотки одной фазы;  $\omega$  – угловая частота первой гармоники потока;  $l$  – номер гармоники;  $m_{ijk}$ ,  $m_{bijk}$ ,  $m_{cijk}$  – коэффициенты полинома, определенные по методу Чебышева.

В уравнениях системы (8) необходимо интегрировать и дифференцировать функции потокосцепления по токам фаз и перемещению ротора. Используемая для аппроксимации регрессионная модель позволяет проводить аналитические дифференцирования и интегрирования потокосцеплений как по токам, так и по перемещению. При этом все производные и значения аппроксимирующей функции в начале и конце периода одинаковы.

При интегрировании системы дифференциальных уравнений (7) на каждом шаге интегрирования необходимо определение как минимум один раз значения выражений (8 и 9), их производные и интегралы, что требует значительных затрат машинного времени. Поэтому предлагается понизить порядок математической модели без упрощения определяющих факторов. Для этого в уравнениях (7) раскроим скобки и представим их в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_1}{dt} = \frac{Aa(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} e_1 + \frac{Ba(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} e_2 + \\ + \frac{Ca(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} e_3 + \frac{Ka(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} \omega + \frac{Laa(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} i_1 R_1 + \\ + \frac{Lab(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} i_2 R_2 + \frac{Lac(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} i_3 R_3; \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{Ab(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} e_1 + \frac{Bb(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} e_2 + \\ + \frac{Cb(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} e_3 + \frac{Kb(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} \omega + \frac{Lba(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} i_1 R_1 + \\ + \frac{Lbb(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} i_2 R_2 + \frac{Lbc(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} i_3 R_3; \\ \frac{di_3}{dt} = \frac{Ac(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} e_1 + \frac{Bc(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} e_2 + \\ + \frac{Cc(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} e_3 + \frac{Kc(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} \omega + \frac{Lca(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} i_1 R_1 + \\ + \frac{Lcb(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} i_2 R_2 + \frac{Lcc(i_1, i_2, i_3, x)}{D(i_1, i_2, i_3, x)} i_3 R_3; \\ F_e(i_1, i_2, i_3, x) - \alpha v - F_C = m_{np} \frac{dv}{dt}; \quad v = \frac{dv}{dt}. \end{array} \right. \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} Aa(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \quad Ba(i_1, i_2, i_3, x) = \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ Ca(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3}; \quad Ab(i_1, i_2, i_3, x) = \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ Bb(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \quad Cb(i_1, i_2, i_3, x) = \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3}; \\ Ac(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2}; \quad Bc(i_1, i_2, i_3, x) = \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cc(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1}; \\ Ka(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} + \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} + \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} - \\ &- \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3}; \\ Kb(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} + \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} - \\ &- \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x}; \\ Kc(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} + \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \\ &- \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1}; \\ Laa(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ Lab(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2}; \\ Lac(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3}; \\ Lba(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1}; \\ Lbb(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ Lbc(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1}; \\ Lca(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2}; \\ Lcb(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x}; \\ Lcc(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2}; \\ D(i_1, i_2, i_3, x) &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \\ &- \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}. \end{aligned}$$

Для понижения порядка модели (10) повторно аппроксимируем выражения:

$$\begin{aligned} f_{u1,1} &= \frac{Aa}{D}, \quad f_{u1,2} = \frac{Ba}{D}, \quad f_{u1,3} = \frac{Ca}{D}, \\ f_{u2,1} &= \frac{Ab}{D}, \quad f_{u2,2} = \frac{Bb}{D}, \quad f_{u2,3} = \frac{Cb}{D}, \\ f_{u3,1} &= \frac{Ac}{D}, \quad f_{u3,2} = \frac{Bc}{D}, \quad f_{u3,3} = \frac{Cc}{D}, \\ f_{r1,1} &= \frac{Laa}{D}, \quad f_{r1,2} = \frac{Lab}{D}, \quad f_{r1,3} = \frac{Lac}{D}, \\ f_{r2,1} &= \frac{Lba}{D}, \quad f_{r2,2} = \frac{Lbb}{D}, \quad f_{r2,3} = \frac{Lbc}{D}, \\ f_{r3,1} &= \frac{Lca}{D}, \quad f_{r3,2} = \frac{Lcb}{D}, \quad f_{r3,3} = \frac{Lcc}{D}, \\ f_{\omega 1} &= \frac{Ka}{D}, \quad f_{\omega 2} = \frac{Kb}{D}, \quad f_{\omega 3} = \frac{Kc}{D}, \end{aligned} \quad (11)$$

полиномами аналогичными по структуре полиномам, применяемым для аппроксимации потокосцеплений и электромагнитной силы, следующими выражениями:

$$f_u = \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n a f_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \times \cos(\omega_l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n b f_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \right] \quad (12)$$

$$\times \sin(\omega_l x) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n c f_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k; \\ f_r = \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n a r_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_1 M + Z)^j (i_2 M + Z)^k \right) \times \cos(\omega_l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n b r_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \right] \quad (13)$$

$$\times \sin(\omega_l x) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n c r_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k; \\ f_\omega = \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n a \omega_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \times \cos(\omega_l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n b \omega_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \right] \quad (14)$$

$$\times \sin(\omega_l x) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n c \omega_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k.$$

Для получения коэффициентов в полиномах (12) – (14) проведем комплекс цифровых экспериментов по определению значения выражений (11) при тех же значениях токов и перемещениях, что и при расчетах магнитного поля. Дискретные значения результатов эксперимента аппроксимируем полиномами Чебышева на множестве равноудаленных точек.

В результате математическая модель трехфазного ЭМП-амортизатора в окончательном виде представляет собой систему дифференциальных уравнений (15), коэффициенты которой определены выражениями (9), (12) – (14):

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \sum_{k=1}^3 f_{u1,k} e_k + \sum_{k=1}^3 f_{r1,k} i_k R_k + f_{\omega 1} v; \\ \frac{di_2}{dt} = \sum_{k=1}^3 f_{u2,k} e_k + \sum_{k=1}^3 f_{r2,k} i_k R_k + f_{\omega 2} v; \\ \frac{di_3}{dt} = \sum_{k=1}^3 f_{u3,k} e_k + \sum_{k=1}^3 f_{r3,k} i_k R_k + f_{\omega 3} v; \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_e(i_1, i_2, i_3, x) - \alpha v - F_C(t)}{m_{np}}; \quad \frac{dx}{dt} = v. \end{cases} \quad (15)$$

На рис. 6 представлены результаты моделирования ЭМП-амортизатора в режиме генератора при постоянной скорости движения ротора.

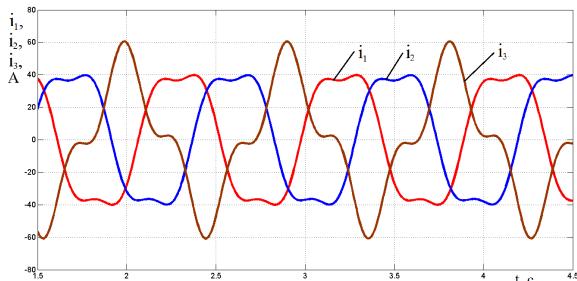


Рис. 6. Результаты моделирования ЭМП-амортизатора

Время моделирования составило 3,2 мин. на компьютере Intel Core 2 DUO, 2,2ГГц, 4Gb ОЗУ. Формы токов фаз имеют несинусоидальный вид, так как фазы находятся в относительной магнитной несимметрии, а также значительное влияние оказывает зубчатость статора и насыщение магнитной системы.

## ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель ЭМП-амортизатора транспортного средства позволяет исследовать динамические процессы и получить его рабочие свойства с учетом различного насыщения участков магнитопровода, геометрических особенностей магнитной системы и торцевого рассеяния магнитного поля.

Предложенная методика понижения порядка математической модели без упрощения ее определяющих факторов и использование аналитических непрерывных зависимостей, описывающих параметры математической модели, позволяет значительно снизить затраты расчетного времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д.Уайт, Г. Вудсон – М.: Издательство "Энергия", 1964. – 528 с.
2. Рымша В.В. Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулый, П.А. Кравченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 24-26.
3. Колпахчан П.Г. Адаптивное управление асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов. – Ростов н/Д.: "Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион", 2006. – 131с.
4. Режим доступа: <http://femm.berlios.de>.

**Bibliography (transliterated):** 1. Uajt D. Elektromehanicheskoe preobrazovanie `energii / D.Uajt, G. Vudson - M.: Izdatel'stvo "Energiya", 1964. - 528 s. 2. Rymsha V.V. Usovremenstvovannaya cepno-polevaya model' ventil'no-reaktivnogo dvigatelya / V.V. Rymsha, I.N. Radimov, M.V. Gulyj, P.A. Kravchenko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2010. - № 5. - S. 24-26. 3. Kolpahchan P.G. Adaptivnoe upravlenie asinhronnym tyagovym privodom magistral'nyh `elektrovozov. - Rostov n/D.: "Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region", 2006. - 131s. 4. Rezhim dostupa: <http://femm.berlios.de>.

Поступила 18.10.2012

Сергиенко Антон Николаевич,  
Сергиенко Николай Егорович, к.т.н., доц.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра "Автомобиле- и тракторостроения"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 707-60-66, e-mail: antonsergienkomax@rambler.ru

Любарский Борис Григорьевич, к.т.н., доц.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра "Электрического транспорта и тепловозостроения"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 707-63-67, e-mail: lboris19111972@mail.ru

Sergienko A.N., Ljubarskiy B.G., Sergienko N.E.  
**A mathematical model of an electromechanical transducer for electric vehicle shock absorber.**

A simulation model of an electromechanical transducer-absorber with a linear stepper motor is developed, which allows determining instantaneous values of the absorber parameters in different vehicle motion regimes. The problem is studied by the example of a car.

**Key words – model, electromechanical transducer, shock absorber, suspension, vehicle.**

## **СТРУКТУРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ЦЕПИ И КОМПЕНСАЦИЯ ТОКА НЕЙТРАЛИ**

*Проведено аналіз 0-складової струму і напруги в чотирьохпровідному колі. Показано як виділити частину кола без 0-складових струму і напруги, еквівалентну вихідному колу по миттєвій потужності без 0-складової. Для синусоїдальних процесів з несиметричною напругою запропоновано алгоритм визначення провідностей LC елементів компенсатора струму нейтралі. При симетричній напрузі викладена методика розрахунку реактивних провідностей 0-компенсатора по провідностям навантаження. Розібрані приклади розрахунків.*

*Проведен анализ 0-составляющей тока и напряжения в четырехпроводной цепи. Показано как выделить часть цепи без 0-составляющих тока и напряжения, эквивалентную исходной цепи по мгновенной мощности без 0-составляющей. Для синусоидальных процессов с несимметричным напряжением предложен алгоритм определения проводимостей LC элементов компенсатора тока нейтрали. При симметричном напряжении изложена методика расчета реактивных проводимостей 0-компенсатора по проводимостям нагрузки. Разобраны примеры расчетов.*

### **ВСТУПЛЕНИЕ**

В 3-проводной цепи (в силу 1 закона Кирхгофа) сумма трех линейных токов равна нулю (трехфазный ток не содержит 0-последовательность). Поэтому *мгновенная мощность* (ММ) инвариантна к выбору точки отсчета (ТО) напряжений трех фаз сечения  $\langle A,B,C \rangle$ . Сумма трех фазных напряжений, измеренных относительно «искусственного заземления» (ИЗ), равна нулю (трехфазное напряжение не содержит 0-последовательность). ИЗ определено центром симметричной звезды с произвольными, но одинаковыми сопротивлениями, которые подключены в сечение  $\langle A,B,C \rangle$ . Тем самым энергетические процессы в 3-проводной цепи с ИЗ не содержат 0-последовательность тока и напряжения. Это позволяет считать их *двумерными*.

Наличие нейтрали в 4-проводной цепи при несимметричной нагрузке приводит к появлению 0-последовательности тока. Однако *мгновенная мощность* 4-проводной цепи инвариантна к выбору точки отсчета (ТО) четырех напряжений (трех фазных напряжений и напряжения нейтрали), что позволяет в качестве ТО напряжений выбрать нулевой провод (не изменения величины ММ) и в каждый момент времени энергетические процессы в 4-проводной цепи считать *трехмерными*.

Если в 4-х проводной цепи исключить (скомпенсировать) 0-последовательность тока и выбрать «искусственное заземление» в качестве ТО, то такая цепь математически становится эквивалентной 3-х проводной цепи с двумерными процессами, что упрощает анализ энергетических процессов [1].

Компенсация 0-последовательности тока позволяет в точке подключения 4-проводной нагрузки отключить ее нейтральный провод от нейтрали 4-х проводной сети и замкнуть его на нейтраль компенсатора 0-последовательности. Это позволяет уменьшить нагрузку на нейтраль всей сети.

Тем самым задача компенсации 0-последовательности тока имеет самостоятельный как научный так и практический смысл.

### **ТОК И НАПРЯЖЕНИЕ 0-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ 4-ПРОВОДНОЙ ЦЕПИ**

#### **Орт 0-последовательности**

$$\mathbf{e}_0 = (1/\sqrt{3})[1, 1, 1]^\tau, |\mathbf{e}_0| = 1 \quad (1)$$

трех фаз (сечения  $\langle A,B,C \rangle$ ) позволяет произвольный 3d-вектор столбец  $\mathbf{x} = (x_a, x_b, x_c)^\tau$  разложить на ортогональные составляющие (здесь и дальше  $\tau$  – операция транспонирования):

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = \mathbf{x}_0 + \mathbf{x}_\Delta; \quad \mathbf{x}_0 \perp \mathbf{x}_\Delta. \quad (2.a)$$

В разложении (1) компонента

$$\mathbf{x}_0 = (\mathbf{x}^\tau \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0 = \frac{x_a + x_b + x_c}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.b)$$

является проекцией вектора  $\mathbf{x} = (x_a, x_b, x_c)^\tau$  на орт 0-последовательности и равна 0-составляющей этого вектора. Прямыми вычислениями можно проверить, что вторая компонента разложения (2.a) равна

$$\mathbf{x}_\Delta = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} 2x_a - x_b - x_c \\ 2x_b - x_a - x_c \\ 2x_c - x_a - x_b \end{bmatrix} \quad (2.b)$$

Составляющая (2.b) является ортогональным дополнением составляющей (2.b) до полного вектора и не содержит 0-составляющей.

При измерении напряжения в сечении  $\langle A,B,C \rangle$  относительно нейтрали 4-проводной системы ММ

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t)) = \mathbf{u}^\tau \mathbf{i} \quad (3)$$

в каждый момент времени равна скалярному произведению 3-х мерных векторов мгновенных значений (м.з.) тока и напряжения трех фаз

$$\mathbf{u} = (u_a(t), u_b(t), u_c(t))^\tau, \quad \mathbf{i} = (i_a(t), i_b(t), i_c(t))^\tau. \quad (4)$$

В силу ортогональности разложения (2.a) в каждый момент времени для 3d-кривых тока и напряжения

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_0 + \mathbf{i}_\Delta, \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_\Delta \quad (5)$$

скалярное произведение (3) представляется как

$$\mathbf{u}^\tau \mathbf{i} = \underbrace{\mathbf{u}_0^\tau \mathbf{i}_0}_{p_0(t)} + \underbrace{\mathbf{u}_\Delta^\tau \mathbf{i}_\Delta}_{p_\Delta(t)}, \quad p(t) = p_0(t) + p_\Delta(t). \quad (6)$$

Вектор напряжений  $\mathbf{u}_\Delta = \mathbf{u} - (\mathbf{u}^\tau \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0$  не содержит 0-последовательности. Тем самым, три напряжения, которые в него входят, измерены относительно ИЗ.

Все три координаты вектора напряжений 0-последовательности

$$\mathbf{u}_0 = (\mathbf{u}^\tau \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0 = (\tilde{u}, \tilde{u}, \tilde{u})^\tau \quad (7)$$

одинаковы

$$\tilde{u} = \tilde{u}(t) = (u_a(t) + u_b(t) + u_c(t))/3$$

и равны разности напряжений между нейтралью и фиктивной точкой отсчета для сечения  $\langle A, B, C \rangle$ .

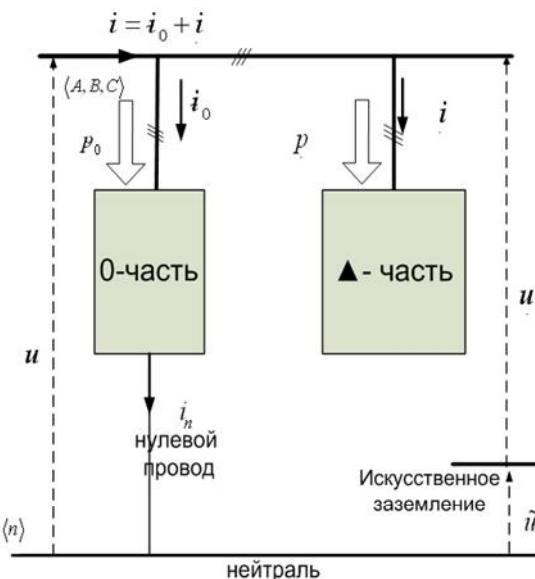


Рис. 1. Структурное представление 4-проводной цепи

В моменты времени  $t$ , когда полный ток не содержит 0-компоненту ( $i_0(t) = 0$ ):

- ток в нейтрали  $i_n(t)$  4-проводной системы отсутствует:

$$i_n(t) = \sqrt{3}i_0(t) = 0; \quad (8.a)$$

- полная ММ не содержит 0-последовательности ММ

$$p_0(t) = i_0(t)u_0(t); \quad (8.b)$$

- мгновенная мощность

$$\mathbf{u}^\tau \mathbf{i} = (\mathbf{u}_\Delta)^\tau \mathbf{i}_\Delta, \quad p(t) = p_\Delta(t) \quad (8.b)$$

определен компонентой тока  $i_\Delta$  без 0-последовательности и компонентой напряжения  $\mathbf{u}_\Delta$  измеренного относительно ИЗ.

0-последовательность тока однозначно связана с током в нейтрали. 0-последовательность напряжения однозначно связана с выбором точки отсчета напряжения. Таким образом, вычитание в каждой фазе из полного тока величины

$$i_n(t)/3 = (i_a(t) + i_b(t) + i_c(t))/3 \quad (9)$$

приводит к компенсации тока 0-компоненты и тем самым к удалению тока нейтрали. Если ток нейтрали (точка заземления) равен нулю, то мощность 0-

последовательности равна нулю  $p_0(t)=0$ . Такая 4-проводная схема с компенсированным током 0-последовательности эквивалентна 3-проводной схеме, в которой напряжения фаз измеряются относительно ИЗ для трех фаз (а не относительно нейтрального провода). Нулевой провод можно отключить, так как ток в нем равен нулю. Если 0-последовательность напряжения 4-проводной системы равна нулю  $u_0(t)=0$ , то мощность  $p_0(t)=0$ , а результаты измерения напряжения относительно нейтрали и искусственной ТО совпадают.

В матричном виде компонента (2.8) записывается как

$$\mathbf{x}_\Delta = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_{\tilde{n}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_\Delta = \hat{D}_\Delta \mathbf{x}. \quad (10)$$

Матрица

$$\hat{D}_\Delta = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (11.a)$$

обладает свойством

$$\hat{D}_\Delta \cdot \hat{D}_\Delta = \hat{D}_\Delta. \quad (11.b)$$

Вектор напряжений

$$\mathbf{u}_\Delta = \hat{D}_\Delta \mathbf{u} \quad (12)$$

не содержит 0-последовательности и равен вектору фазных напряжений, измеренному относительно ИЗ.

Алгоритм (12) позволяет измерять фазное напряжение  $\mathbf{u}$  относительно произвольной ТО и переводить его в напряжение относительно искусственного заземления. Если исходное напряжение не содержит 0-последовательности, то в силу (11.b)  $\hat{D}_\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u}$ .

### КОМПЕНСАЦИЯ ТОКА НЕЙТРАЛИ В СИНУСОИДАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

В трёхпроводном сечении  $\langle A, B, C \rangle$  трехфазной системы с синусоидальными процессами

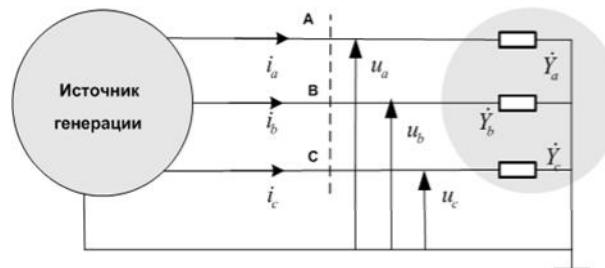


Рис. 2. 3-фазная 4-проводная схема

#### м.з. напряжения и тока

$$\mathbf{u} = (u_a(t), u_b(t), u_c(t))^\tau = \sqrt{2} \operatorname{Re}[U e^{j\omega t}], \quad (13)$$

$$\mathbf{i} = (i_a(t), i_b(t), i_c(t))^\tau = \sqrt{2} \operatorname{Re}[I e^{j\omega t}] \quad (14)$$

однозначно определены трехмерными комплексными векторами (3- комплексами) напряжения и тока

$$\mathbf{U} = (\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)^\tau, \quad \mathbf{I} = (\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c)^\tau.$$

3-комплексы (вектора комплексных действующих величин) определяются как

$$\mathbf{U} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_s^{s+T} \mathbf{u}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad \mathbf{I} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_s^{s+T} \mathbf{i}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (15)$$

где  $T$  – период ( $T\omega=2\pi$ ),  $s$  – произвольное число  $\geq 0$ . В частности, м.з. токов и напряжений 0-последовательности в синусоидальном режиме

$$\mathbf{u}_0(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re}[\mathbf{U}_0 e^{j\omega t}], \quad (16.a)$$

$$\mathbf{i}_0(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re}[\mathbf{I}_0 e^{j\omega t}] \quad (16.b)$$

однозначно определены 3-комплексами напряжения и тока 0-последовательности

$$\mathbf{U}_0 = (\mathbf{U}^\tau \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0, \quad \mathbf{I}_0 = (\mathbf{I}^\tau \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0. \quad (16.b)$$

Из (5) следует разложение 3-комплексов

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_\Delta, \quad \mathbf{I} = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_\Delta, \quad (16.g)$$

где  $\mathbf{U}_\Delta = \hat{D}_\Delta \mathbf{U}$ ,  $\mathbf{I}_\Delta = \hat{D}_\Delta \mathbf{I}$  – 3-комплексы напряжения и тока без 0-последовательности. В синусоидальном режиме 3-комплексы напряжений и токов в нагрузке цепи (рис. 2) связаны тремя законами Ома

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{Y}_a \dot{U}_a \\ \dot{I}_b &= \dot{Y}_b \dot{U}_b, \quad \mathbf{I} = \hat{Y} \mathbf{U} \\ \dot{I}_c &= \dot{Y}_c \dot{U}_c \end{aligned} \quad (17)$$

Матрица комплексных проводимостей фаз нагрузки – диагональная  $\hat{Y} = \operatorname{diag}\{\dot{Y}_a, \dot{Y}_b, \dot{Y}_c\}$ . В общем случае нагрузка несимметрична  $\dot{Y}_a \neq \dot{Y}_b \neq \dot{Y}_c$ .

0-последовательность тока трехфазной нагрузки

$$\mathbf{I}_0 = \dot{I}_0 \mathbf{e}_0 = \frac{1}{3} (\dot{Y}_a \dot{U}_a + \dot{Y}_b \dot{U}_b + \dot{Y}_c \dot{U}_c) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18.a)$$

оценивается комплексной величиной

$$\dot{I}_0 = \mathbf{I}_0^\tau \mathbf{e}_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{Y}_a \dot{U}_a + \dot{Y}_b \dot{U}_b + \dot{Y}_c \dot{U}_c). \quad (18.b)$$

Комплекс тока нейтрали и тока 0-последовательности удовлетворяют условию

$$\dot{I}_n = \sqrt{3} \dot{I}_0 = \dot{Y}_a \dot{U}_a + \dot{Y}_b \dot{U}_b + \dot{Y}_c \dot{U}_c. \quad (18.b)$$

Ток 0-последовательности можно скомпенсировать реактивными элементами, которые подключают фазы к нулевому проводу. Компенсатор 0-последовательности – полностью задан диагональной матрицей  $\hat{B}_K = \operatorname{diag}\{Bk_a, Bk_b, Bk_c\}$  реактивных проводимостей. 3-комплекс тока 0-компенсатора

$$\mathbf{Ik} = (\dot{k}_a, \dot{k}_b, \dot{k}_c)^\tau \quad (19)$$

и 3-комплекс напряжения (15) связаны матричным законом Ома

$$\begin{bmatrix} \dot{k}_a \\ \dot{k}_b \\ \dot{k}_c \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} Bk_a \dot{U}_a \\ Bk_b \dot{U}_b \\ Bk_c \dot{U}_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Ik} = j \hat{B}_K \mathbf{U}. \quad (20)$$

0-последовательность тока компенсатора

$$\mathbf{Ik}_0 = \dot{k}_0 \mathbf{e}_0 = \underbrace{(I_0^\tau \mathbf{e}_0)}_{\dot{k}_0} \mathbf{e}_0 \quad (21)$$

должна быть в противофазе с 0-последовательностью тока нагрузки

$$\mathbf{Ik}_0 = -I_0 \quad (\dot{k}_0 = -\dot{I}_0). \quad (22.a)$$

Условие (22.a) равносильно равенству

$$Bk_a \dot{U}_a + Bk_b \dot{U}_b + Bk_c \dot{U}_c = j \dot{I}_n. \quad (22.b)$$

Комплекс тока нейтрали измеряется или, если нагрузка известна, вычисляется согласно (18.b). В уравнении (22.b) с комплексными коэффициентами неизвестны три вещественные величины ( $Bk_a, Bk_b, Bk_c$ ). Алгебраическая форма комплексов тока и напряжения

$$\dot{I}_n = I_n' + j I_n'', \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U'_a + j U''_a \\ U'_b + j U''_b \\ U'_c + j U''_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

разделяет уравнение (22.b) на вещественную и мнимую части и дает систему двух вещественных уравнений с тремя неизвестными. Система неопределенна и имеет бесконечное множество решений. Одно неизвестное можно выбрать произвольно. Полагаем  $Bk_c=0$ , что приводит к системе уравнений с двумя неизвестными ( $Bk_a, Bk_b$ )

$$\begin{cases} Bk_a U'_a + Bk_b U'_b = -I_n'', \\ Bk_a U''_a + Bk_b U''_b = I_n' \end{cases} \quad (24.a)$$

$$\begin{bmatrix} U'_a & U'_b \\ U''_a & U''_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Bk_a \\ Bk_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_n'' \\ I_n' \end{bmatrix}. \quad (24.b)$$

Система (24) однозначно разрешается, если

$$\Delta = U'_a U''_b - U''_a U'_b \neq 0.$$

Матрица

$$\hat{U} = \begin{bmatrix} U'_a & U'_b \\ U''_a & U''_b \end{bmatrix} \quad (25)$$

имеет обратную

$$\hat{U}^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} U''_b & -U'_b \\ -U''_a & U'_a \end{bmatrix}. \quad (26.a)$$

При несимметричном синусоидальном напряжении получим явные формулы

$$\begin{bmatrix} Bk_a \\ Bk_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} U''_b & -U'_b \\ -U''_a & U'_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_n'' \\ I_n' \end{bmatrix} \quad (26.b)$$

для вычисления реактивных проводимостей компенсатора 0-последовательности (0-компенсатора).

СИММЕТРИЧНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ.  
МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ КООРДИНАТ  
Если напряжение симметрично прямой последовательности  $\mathbf{U} = U e_1$ , то вектор тока нагрузки (17) определен проводимостями нагрузки, как

$$\mathbf{I} = [i_a, i_b, i_c]^\tau = \frac{\dot{U}}{\sqrt{3}} [\dot{Y}_a, \dot{Y}_b \alpha^*, \dot{Y}_c \alpha]^\tau. \quad (27)$$

Здесь и дальше

$$\mathbf{e}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} [1, \alpha^*, \alpha]^\tau, \mathbf{e}_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} [1, \alpha, \alpha^*]^\tau$$

– орты прямой и обратной последовательностей ( $\alpha = e^{j120^\circ}$ ). Фазоры (комплексы) токов симметричных последовательностей нагрузки вычисляются согласно [1, 2]

$$\begin{aligned} i_1 &= \mathbf{I}^\tau \mathbf{e}_2 = \dot{U} (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c)/3 \\ i_2 &= \mathbf{I}^\tau \mathbf{e}_1 = \dot{U} (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b \alpha + \dot{Y}_c \alpha^*)/3. \\ i_0 &= \mathbf{I}^\tau \mathbf{e}_0 = \dot{U} (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b \alpha^* + \dot{Y}_c \alpha)/3 \end{aligned} \quad (28)$$

Фазоры токов симметричных последовательностей компенсатора равны

$$\begin{aligned} i_{K1} &= \mathbf{I}_K^\tau \mathbf{e}_2 = \dot{U} (B_{Ka} + B_{Kb} + B_{Kc})/3 \\ i_{K0} &= \mathbf{I}_K^\tau \mathbf{e}_0 = \dot{U} (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha^* + B_{Kc} \alpha)/3. \\ i_{K2} &= \mathbf{I}_K^\tau \mathbf{e}_1 = \dot{U} (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha + B_{Kc} \alpha^*)/3 \end{aligned} \quad (29)$$

Введем обозначения для проводимостей 0, 1, 2 – последовательностей компенсатора

$$\begin{aligned} B_{K1} &= (B_{Ka} + B_{Kb} + B_{Kc})/3 \\ B_{K0} &= (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha^* + B_{Kc} \alpha)/3. \\ B_{K2} &= (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha + B_{Kc} \alpha^*)/3 \end{aligned} \quad (30.a)$$

Обозначим [1, 2]

$$\dot{Y}_0 = (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b \alpha^* + \dot{Y}_c \alpha)/3 \quad (30.b)$$

– проводимость 0-последовательности нагрузки. Дополнительно к условию  $i_{K0} + i_0 = 0$  потребуем, чтобы 0-компенсатор не изменял ток прямой последовательности ( $i_{K1} = 0$ ). Тогда будем иметь два уравнения для определения трех неизвестных

$$\begin{aligned} (B_{Ka} + B_{Kb} + B_{Kc})/3 &= 0 \\ (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha^* + B_{Kc} \alpha)/3 &= j\dot{Y}_0. \end{aligned} \quad (31.a)$$

Так как проводимости обратной и нулевой последовательностей компенсатора комплексно сопряжены  $B_{K2} = (B_{K0})^*$ , то 2-последовательность тока компенсатора невозможно выбрать произвольно (в частности, сделать равной нулю). Поэтому уравнения (31.a) дополним уравнением, комплексно сопряженным ко второму уравнению (31.a)

$$(B_{Ka} + B_{Kb} \alpha + B_{Kc} \alpha^*)/3 = (j\dot{Y}_0)^* \quad (31.b)$$

Запишем систему уравнений (31) в матричном виде

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^* & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{Ka} \\ B_{Kb} \\ B_{Kc} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 \\ j\dot{Y}_0 \\ (j\dot{Y}_0)^* \end{bmatrix} \quad (32)$$

Матричное уравнение (32) однозначно разрешается, так как модифицированная матрица Фортексью [1, 2]

$$\hat{F} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^* & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^* \end{bmatrix} \quad (33.a)$$

имеет обратную матрицу (равную комплексно-сопряженной)

$$\hat{F}^{-1} = \hat{F}^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^* & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^* \end{bmatrix}. \quad (33.b)$$

Умножая слева матричное уравнение (32) на матрицу  $\hat{F}^{-1}$  получим явные формулы

$$\begin{bmatrix} B_{Ka} \\ B_{Kb} \\ B_{Kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \operatorname{Re}(j\dot{Y}_0) \\ 2 \operatorname{Re}(e^{j210^\circ} \dot{Y}_0) \\ 2 \operatorname{Re}(e^{-j30^\circ} \dot{Y}_0) \end{bmatrix} \quad (34)$$

для вычисления проводимостей 0-компенсатора по проводимости 0-последовательности нагрузки.

После компенсации суммарный трехфазный ток в фазах равен

$$\mathbf{I}_\Sigma = \hat{Y}_\Sigma \mathbf{U}. \quad (35)$$

Диагональная матрица  $\hat{Y}_\Sigma = \hat{Y} + j\hat{B}_K$  равна сумме диагональных матриц нагрузки и компенсатора.

Связь фазных и симметричных координат суммарного трехфазного тока

$$\mathbf{I}_\Sigma = (i_{\Sigma a}, i_{\Sigma b}, i_{\Sigma c})^\tau, \tilde{\mathbf{I}}_\Sigma = (i_{\Sigma 0}, i_{\Sigma 1}, i_{\Sigma 2})^\tau \quad (36)$$

обеспечивается модифицированной матрицей Фортексью (33.a)

$$\tilde{\mathbf{I}}_\Sigma = \hat{F} \mathbf{I}_\Sigma.$$

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА КОМПЕНСАТОРА ТОКА НЕЙТРАЛИ

Расчет проводился для синусоидального режима при симметричном напряжении. В рассматриваемых ниже примерах использованы базовые величины: проводимости  $Y_b$ , напряжения  $U_b$ , тока  $I_b$ , которые удовлетворяют соотношению  $U_b = Y_b I_b$ . Величина  $U_b = |\mathbf{U}|$  равна действующему значению трехфазного напряжения.

Расчет выполнялся для цепи (см. табл.1) с:

1. однофазной чисто активной нагрузкой;
2. однофазной активно-индуктивной нагрузкой;
3. чисто активной несимметричной нагрузкой;
4. разнородной по фазам (с одинаковыми модулями импедансов фаз) нагрузкой.

Таблица 1

Проводимости нагрузки

№	1	2	3	4
$\dot{Y}_a$	$Y_6$	$Y_6 e^{-j30}$	$2Y_6$	$Y_6$
$\dot{Y}_b$	0	0	$Y_6$	$-jY_6$
$\dot{Y}_c$	0	0	$Y_6$	$jY_6$

Проводимости 0-компенсатора вычислялись согласно (34). Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Проводимости 0-компенсатора

№	1	2	3	4
$B_{K_a}$	0	$Y_6/3$	0	0
$B_{K_b}$	$-Y_6/\sqrt{3}$	$-2Y_6/3$	$-Y_6/\sqrt{3}$	$Y_6(1-1/\sqrt{3})$
$B_{K_c}$	$Y_6/\sqrt{3}$	$Y_6/3$	$Y_6/\sqrt{3}$	$Y_6(1/\sqrt{3}-1)$

Результаты расчета симметричных координат токов до и после компенсации сведены в табл. 3.

Таблица 3

Симметричные координаты токов

№		1	2	3	4
До	$ I $	$I_6/\sqrt{3}$	$I_6/\sqrt{3}$	$\sqrt{2} I_6$	$I_6$
	$\dot{I}_0$	$I_6/3$	$I_6 e^{-j30}/3$	$I_6/3$	$I_6(1-\sqrt{3})/3$
	$\dot{I}_2$	$I_6/3$	$I_6 e^{j30}/3$	$I_6/3$	$I_6(1+\sqrt{3})/3$
	$\dot{I}_1$	$I_6/3$	$I_6 e^{j30}/3$	$I_6 4/3$	$I_6/3$
После	$\dot{I}_{\Sigma 0}$	0	0	0	0
	$\dot{I}_{\Sigma 2}$	$I_6 2/3$	$I_6/\sqrt{3}$	$I_6 2/3$	$I_6 2/3$
	$\dot{I}_{\Sigma 1}$	$I_6/3$	$I_6 e^{-j30}/3$	$I_6 4/3$	$I_6/3$
	$ I_{\Sigma} $	$I_6 \sqrt{5}/3$	$I_6 2/3$	$I_6 2\sqrt{5}/3$	$I_6 \sqrt{5}/3$

После компенсации суммарный ток (нагрузка + компенсатор) не содержит 0-последовательность (и следовательно ток нейтрали равен 0). Ток 1-последовательности (который содержит активный ток) не изменился. Возрос ток 2-последовательности и, следовательно, полный трехфазный ток также возрос. Процессы становятся двумерными и представляются токами прямой и обратной последовательности. Компенсация 2-последовательности вместе с компенсацией реактивного тока 1-последовательности выполняется на следующем этапе в рамках эквивалентной трехпроводной системы, например, методом Фризе [2, 3].

## ВЫВОДЫ

Для 4-проводной схемы проведенный анализ выявил особую роль 0-последовательности тока и напряжения. Показано как выделить 3-проводную цепь, эквивалентную 4-проводной схеме с компенсированным током 0-последовательности. Такая эквивалентная 4-проводная схема поставляет в нагрузку ММ без нулевой последовательности. Алгоритм определения реактивных проводимостей 0-компенсатора позволяет оценить его работу для синусоидальных процессов при симметричном и несимметричном напряжении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

- Сиротин Ю.А. Анализ энергетических процессов в трехпроводной схеме // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – № 41. – С. 118-133.
- Сиротин Ю.А. Схема симметризации Штейнметца как частный случай оптимального компенсатора Фризе // Электрика. – № 1. – 2011. – С. 16-21.
- Sirotin, Yu.A. Fryze's compensator and Fortescue transformation . "Przeglad Elektrotechniczny"(Electrical Review). – 2011. – Vol. 1. – 101-106.

**Bibliography (transliterated):** 1. Sirotin Yu.A. Analiz `energeticheskikh processov v trehprovodnoj sheme // Visnik NTU "HPI". - 2011. - № 41. - S. 118-133. 2. Sirotin Yu.A. Shema simmetrizacii Shtejnmetca kak chastnyj sluchaj optimal'nogo kompensatora Frize // `Elektrika. - № 1. - 2011. - S. 16-21. 3. Sirotin, Yu.A. Fryze's compensator and Fortescue transformation . "Przeglad Elektrotechniczny"(Electrical Review). - 2011. - Vol. 1. - 101-106.

Поступила 31.10.2012

Сиротин Юрій Олександрович, к.т.н, доц.

Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"  
кафедра "Автоматизація енергосистем"  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 343-36-82, e-mail: yuri\_sirotin@ukr.net

Sirotin Y.A.

**Structural separation of processes in a three-phase four-wire circuit and neutral current compensation.**

Analysis of current and voltage 0-components in a three-phase four-wire circuit is made. It is shown how to select part of the circuit without the current and voltage 0-components which is equivalent to the original circuit in terms of instant power without the 0-component. For sinusoidal processes with asymmetric voltage, a computation algorithm for neutral current compensator LC elements conductivity is proposed. For symmetrical voltage, a 0-compensator susceptibility calculation methodology based on load conductance is presented. Example calculations are analyzed.

**Key words – three-phase four-wire circuit, null susceptance, neutral current compensation.**

## ФИНКЕЛЬШТЕЙН ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ

(К 70-летию со дня рождения)

Владимир Борисович Финкельштейн родился 17 декабря 1942 года в г. Душанбе (тогда Сталинабаде Таджикской ССР). Отец его в те годы был офицером, а мать музработником. Его трудовой путь начался в возрасте шестнадцати лет. С 1959 по 1962 г.г. работал токарем и одновременно окончил вечернюю школу. В 1960 г. и поступил на вечерний факультет Харьковского политехнического института. В 1966 г. окончил ХПИ по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок», получив квалификацию инженера-электромеханика. С 1962 по 1992 г.г. работал в НПО «Укрэлектромаш», где прошел трудовой путь от электромонтера до главного специалиста. С 1968 по 1969 г.г. служил в рядах Советской Армии. Работая в НПО «Укрэлектромаш», в 1971 г., защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование внешних магнитных полей вращающихся электрических машин», а в 1990 г. – диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Особенности электрофизических процессов асинхронных двигателей для судостроения».

В 1994 г. В.Б. Финкельштейну было присвоено учено звание профессора. Результатами этого периода его деятельности являются:

- способы и средства гашения внешних постоянных и переменных магнитных полей асинхронных машин;
- объяснение физической сущности резкого изменения внешнего переменного магнитного поля и вибрации на удвоенной частоте сети асинхронного двигателя при изменении направления его вращения путем изменения чередования фаз сети относительно фаз обмотки машины, а также разработка рекомендаций, исключающих это явление;
- разработка симметрирующего устройства, позволяющего получить симметричное напряжение на двигателе при асимметрии питающей сети;
- методика определения оптимального магнитного потока асинхронного двигателя по критерию получения максимального КПД;
- разработка активных частей электродвигателей серии АИР и специальных серий, соответствующих предъявляемым требованиям по внешним переменным и постоянным магнитным полям и уровню виброакустических характеристик;
- разработка активных частей однофазных двигателей на базе серии АИР;
- разработка способов и устройств определения величины статического и динамического эксцентри-

ситетов на работающем асинхронном двигателе без его разборки;

- выявление и математическое описание процессов в асинхронных машинах, ранее не охваченных теорией.

Направление научной деятельности профессора В.Б. Финкельштейна – это нелинейное математическое моделирование электромагнитных и электромеханических процессов в электрических машинах. В рамках этого направления им подготовлено шесть кандидатов технических наук. Исследованы переходные токи и моменты в асинхронных генераторах ветроэнергетических установок, а также разработаны рекомендации и устройства, обеспечивающие уменьшение их размеров.

Характерной чертой деятельности В.Б. Финкельштейна является

четкая промышленно-производственная направленность. После перехода в 1992 г. на преподавательскую работу в Харьковскую национальную академию городского хозяйства, где он читает курс «Электрические машины», В.Б. Финкельштейн продолжает сотрудничать с СКБ «Укрэлектромаш». Длительный период он сотрудничал с Харьковским агрегатным конструкторским бюро и с Уиндэнерго ЛТД. В рамках этого сотрудничества им разработаны активные части высокоскоростных асинхронных двигателей на 30000 об/мин для воздухо-климатической системы, высокоскоростные двигатели для авиационных насосных станций, устанавливаемых на новых самолетах, превзошедшие по своим массогабаритным и энергетическим показателям существующие аналоги, двигатель для безредукторных лифтов, а также вентильный реактивный двигатель. В настоящее время ведется разработка двигателя для лопастных гидравлических машин, которые будут перекачивать сжиженный газ.

Профессор В.Б. Финкельштейн является автором многих научных статей в ведущих отечественных журналах, а также целого ряда изобретений.

Ректорат Харьковской национальной академии городского хозяйства, профком, деканат факультета электроснабжения и освещения городов, сотрудники кафедры теоретической и общей электротехники желают Владимиру Борисовичу крепкого здоровья, дальнейших творческих успехов в педагогической и научно-технической работе на благо нашей Родины.

Редакционная коллегия журнала «Электротехника и электромеханика», активным автором которого является проф. В.Б. Финкельштейн, присоединяется к этим пожеланиям.

