

ISSN 2074-272X

науково-практичний  
журнал

2013/3

# Електротехніка і Електромеханіка

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Електричні машини та апарати

Техніка сильних електричних та магнітних полів

Електричний транспорт

Електричні станції, мережі і системи

Ювілеї

Інформація



# 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
Розов В.Ю.	д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, директор НТЦ МТО НАНУ, Харків
Подольцев О.Д.	д.т.н., головний 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, заступник директора ІВЕ НАНУ, Київ
Рудаков В.В.	д.т.н., професор, завідувач кафедри інженерної електрофізики НТУ «ХПІ», Харків
Сокол Є.І.	д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ 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», 2013

Підписано до друку 14.06.2013 р.

Формат 60 x 90 ¼. Офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,375.

Наклад 200 прим. Зам. № 0154/0224. 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



**EIE**

Рекомендовано до видання Вченого радио Національного технічного  
університету «Харківський політехнічний інститут»  
Протокол №5 від 04 червня 2013 р.

**2013/3**

## ЗМІСТ

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

<b>Баранов М.И.</b>	Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 14: Изобретение двигателей	<b>3</b>
<b>Савич Э.В.</b>	Процесс образования магнитных полей планет	<b>15</b>

### **Електричні машини та апарати**

<b>Байда Е.И.</b>	Влияние магнитной проницаемости и удельного сопротивления магнитопровода бистабильных поляризованных актуаторов на время их трогания	<b>18</b>
<b>Васьковский Ю.Н., Коваленко М.А.</b>	Диагностика комбинированных дефектов ротора асинхронного двигателя индукционным методом	<b>21</b>
<b>Канов Л.Н.</b>	Оптимизация нагрузочных режимов регулируемого асинхронного электропривода	<b>25</b>
<b>Pantelyat M.G.</b>	Multiphysical numerical analysis of electromagnetic devices: state-of-the-art and generalization	<b>29</b>
<b>Шевченко В.В., Павленко Т.П.</b>	Особенности выбора электродвигателей для технологических объектов энергоблоков АЭС	<b>36</b>

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

<b>Баранов М.И.</b>	Усовершенствование микродипольной модели шаровой молнии и электродинамическое развитие теории этого явления	<b>42</b>
<b>Гнатов А.В.</b>	Управляемость процессом бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки	<b>51</b>

### **Електричний транспорт**

<b>Доманський І.В.</b>	Системний аналіз зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць	<b>54</b>
<b>Сергиенко А.Н., Любарський Б.Г., Сергиенко Н.Е.</b>	Аппроксимация параметров математической модели электроамортизатора	<b>64</b>

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

<b>Саприка В.А.</b>	Прогнозирование отклонения напряжения в электрических сетях	<b>68</b>
---------------------	---	-----------

## **Інформація**

Собчак А.П.,  
Кот М.Г.

Применение искусственного интеллекта в мехатронных системах

**70**

## **Ювілеї**

Зекцер Д.М.

К 90-летию со дня рождения

**74**

Юхимчук В.Д.

К 75-летию со дня рождения

**75**

## **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 перереєстровано постановою президії ВАК України від 10 лютого 2010 р. № 1-05/1. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.*

*Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу «Електротехніка і Електромеханіка» та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (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://nbuv.ton.gov.ua> в розділі «Інформаційні ресурси / Наукова періодика України» починаючи з 2005 року, а також на сайті <http://eie.khpi.edu.ua>.*

*У квітні 2013 р. журнал «Електротехніка і Електромеханіка» включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA), а також індексується європейською системою пошуку наукової інформації DRIVER ([www.driver-repository.eu](http://www.driver-repository.eu)), в системі BASE ([www.base-search.net](http://www.base-search.net)), російським індексом наукового цитування (РИНЦ) та Index Copernicus.*

*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 14: ИЗОБРЕТЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Наведено короткий нарис з всесвітньої історії винаходу двигунів різного виду, що з'явилися енергетичним "серцем" для всіх транспортних засобів на нашій планеті.*

*Приведен краткий очерк из всемирной истории изобретения двигателей различного вида, явившихся энергетическим "сердцем" для всех транспортных средств на нашей планете.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Движение, как известно, это "жизнь". Оно (движение) является "жизнью" не только для биологических объектов, но и для большинства технических объектов. Как привести в движение различного вида физическое тело, тот или иной технический объект? Как придать подобному движущемуся телу (объекту) или его части наибольшее ускорение и наивысшую скорость? Как преобразовать один вид движения технического объекта в другой? Как уменьшить при этом паразитные потери энергии и повысить коэффициент полезного действия (КПД) для движущегося объекта? Вот тот перечень основных вопросов, возникавших сотни лет тому назад и возникающих поныне перед учеными-механиками, инженерами и конструкторами, занимающимися разработкой и созданием новой техники. Из всемирной истории развития техники всем нам хорошо известно, что "рождение" подобных объектов в техносфере землян определяется потребностями человеческого общества. Главными из них в нашем мире были и остаются: 1) неуклонное прогрессивное развитие разных отраслей промышленности всех стран для удовлетворения все возрастающих человеческих потребностей; 2) защита государственных и частных интересов, включающих территориальную целостность стран, экономическую выгоду и интеллектуальную собственность. Начиная с древних времен (например, с периода проживания и деятельности в 287-212 гг. до н.э. великого древнегреческого ученого-механика Архимеда), продолжая в средневековые (например, в период проживания и работы в 1452-1519 гг. великого итальянского ученого-мыслителя и изобретателя Леонардо да Винчи и в период жизни и активной творческой деятельности в 1642-1727 гг. великого английского ученого-механика Исаака Ньютона) и заканчивая современным временем, выдающиеся представители рода человеческого постоянно "бились" и "боятся" над совершенствованием и дальнейшим развитием технических объектов военного и общегражданского назначения [1-3]. Для всех этих объектов, перемещающихся по земле (под землей), по воде (под водой), в воздухе и безвоздушном пространстве (космосе) характерным является то, что все они в своем составе содержат энергетическое "сердце" – двигатель того или иного вида, приводящий в нужное движение их части или эти объекты в целом. На взгляд автора, интересной для читателя и актуальной в области истории техники представляется научно-историческая задача по рассмотрению эволюции (это слово происходит от латинского слова "evolutio" – "процесс развития" [4]) становления, непрерывного совершенствования и прогрессивного развития в технической сфере двигателей различных видов и типов.

### **1. ИЗОБРЕТЕНИЕ ПАРОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Исторически известно, что еще великий флорентиец Леонардо да Винчи описал пушку, выстреливающую снарядами при помощи сил только от огня и воды [5]. Он предполагал, что медный ствол пушки с ядром, размещенным своим одним концом в условиях горячей печи, сможет выбросить снаряд, если в отсек сильно разогретого ствола за ядром вприснуть воду. Леонардо да Винчи полагал, что вода при высокой температуре испарится очень быстро и, став паром и практически аналогом пороха, вытолкнет из такого ствола ядро с большой скоростью. Несмотря на заманчивость такой технической идеи и неоднократные попытки европейских военных инженеров (даже в 19-м столетии), создать подобную боевую пушку не удалось никому. Тем не менее, в 1681 году французский ученый Дени Папен решил создать машину для откачки подземных (грунтовых) вод из шахт, применив при этом в качестве движущей силы вначале порох, а позже и водяной пар [5]. Так на свет появилась пароатмосферная машина, уже прогрессивно содержащая цилиндрический поршень. Основной недостаток машины Д. Папена заключался в том, что пар готовился внутри ее цилиндра. В усовершенствование этой машины большой вклад внесли английские изобретатели Томас Севери, в насосе которого (патент от 1698 года на первую в мире паровую машину) приготовление пара происходило вне его цилиндра в отдельном котле, и Томас Ньюкомен, который в 1705 году изобрел паровой насос с цилиндром и поршнем, а также известный российский изобретатель-самоучка и механик Иван Иванович Ползунов, создавший к 1766 году новую на то время паровую машину [1, 5]. Далее в 1768 году патент на первый паровой двигатель с конденсатором (охладителем пара) получает выдающийся английский механик Джеймс Уатт (1736-1819 гг.). Шли годы и в 1784 году Дж. Уатт, работая над усовершенствованием машины Т. Ньюкомена, построил универсальный **паровой двигатель**, пригодный для широкого промышленного использования в ткацкой и машиностроительной технике (рис. 1). В данном двигателе Дж. Уаттом был применен так называемый кривошипно-шатунный механизм, преобразовывающий возвратно-поступательное движение поршня рабочего цилиндра, обусловленное водяным паром, во вращательное движение колеса [5, 6]. Применив этот двигатель, Дж. Уатт для потребностей металлообработки создал первый паровой молот. Следует заметить, что после этих изобретений Дж. Уатта мировое развитие тепловых машин пошло стремительными темпами. Укажем, что серьезные изменения в тепловые машины Дж. Уатта были вне-

© М.И. Баранов

сены лишь в середине 19-го столетия английским изобретателем Д Несмитом (1808-1890 гг.) [1, 5]. К 1843 году он создал кузнечный молот, в котором паровая машина и ударник были объединены в один механизм (рис. 2) [1, 6].

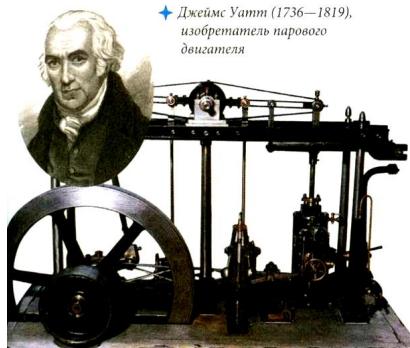


Рис. 1. Первый паровой двигатель выдающегося английского механика и изобретателя Джеймса Уатта [1]

Отметим, что паровой молот Д Несмита произвел, образно говоря, техническую "революцию" в области машиностроения. Этот вид кузнечного оборудования с использованием парового двигателя в 19-ом веке получил широкое внедрение по всему миру [1, 6].

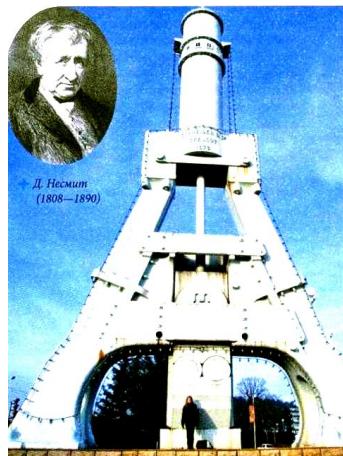


Рис. 2. Мощный паровой молот разработки конца 19-го века известного английского изобретателя Джеймса Несмита [1]

Поэтому можно обоснованно считать, что исторически все машины практически пришли к нам из горной, текстильной и металлообрабатывающей промышленности, использующих силу горячего водяного пара.

## 2. ИЗОБРЕТЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Поскольку возможности **парового двигателя** были ограниченными, а его энергетические показатели не высокими (при низком КПД, не превышающем 10 %, он был к тому же еще и громоздким), то изобретатели всего мира продолжали поиски более эффективных двигателей, использующих иные, чем горячий пар источники энергии. История создания двигателя внутреннего сгорания (ДВС) уходит своими корнями к началу 19-го столетия [7]. В 1801 году французский инженер Филипп Лебон (1769-1804 гг.) получил патент на конструкцию **газового двигателя**, работающего на сгорании в камере открытого им светильного газа и который можно считать плавным переходом от

парового двигателя к ДВС [8]. Реализовать ему самому этот переход, к нашему большому сожалению, не удалось из-за своей трагической гибели в 1804 году. Необходимо отметить, что в газовом двигателе Ф. Лебона уже имелись камера смешивания и два компрессора (один для подачи в эту камеру сжиженного воздуха, а другой – для подачи в нее сжиженного светильного газа от газогенератора) [8]. После указанного смешивания этих газов образовавшаяся газовоздушная смесь поступала в рабочий цилиндр двигателя, где вспыхивала и выделяла энергию, приводящую его поршень в движение. Далее, в 1860 году бельгийский механик Жан Этьен Ленуар (1822-1900 гг.) построил оригинальный газовый двигатель, в котором воспламенение в его рабочей камере горючей смеси происходило при помощи электрической искры [7, 9]. Так на свет впервые появился первый двухтактный **двигатель внутреннего сгорания** (рис. 3), который был прост в эксплуатации, имел небольшие габаритные размеры и вес. Однако, из-за своего низкого КПД (не более 5 % [9]) он не получил широкого коммерческого успеха и технического применения. В истории техники Ж.Э. Ленуара оказался лишь одним из тех людей, кто приближал прогресс на нашей планете и не получал при этом, как правило, ни славы, ни денег [9].



Рис. 3. Первый двухтактный ДВС известного бельгийского изобретателя Жан Этьен Ленуара (модель 1862 года) [9]

В дальнейшем за усовершенствование этого типа ДВС (двигателя Ленуара) взялся известный немецкий инженер Николаус Август Отто (1832-1891 гг.), который вскоре довел его КПД до 15 %. Этот показатель превосходил КПД самых лучших паровых машин того времени. В 1866 году Н.А. Отто получил патент на двухтактный ДВС, работающий на светильном газе (рис. 4) [10, 11]. Главная техническая находка ("изюминка") Н.А. Отто заключалась в том, что в конструкции этого двухтактного газового двигателя с кривошипо-шатунным механизмом химическая энергия сгоревшего в его цилиндре газообразного топлива использовалась с наибольшей на то время полнотой. В 1867 году этот двухтактный двигатель получил золотую медаль на парижской Всемирной ярмарке [11].

Но самым революционным шагом в мировом двигателестроении стало очередное изобретение окрыленного первым успехом Н.А. Отто четырехтактного цикла работы двигателя ("цикла Отто": выпуск, сжатие, рабочий ход, выпуск), сделанное им в 1876 году и которое и поныне лежит в основе работы подавляющего большинства ДВС [11]. Благодаря этому циклу двигатель Отто стал в пять раз экономичнее двигателя Ленуара [10]. К 1897 году двигателестроительной компанией "Отто и Ко" было выпущено до 42 тысяч таких ДВС разной мощности (рис. 5). Более массовое производство запатентованного Н.А. Отто четырехтактного ДВС сдержи-

валось отсутствием на то время в промышленно развитых странах необходимых мощностей для производства светильного газа.



Рис. 4. Музейный экспонат первого двухтактного ДВС известного немецкого изобретателя-механика Н.А. Отто [11]

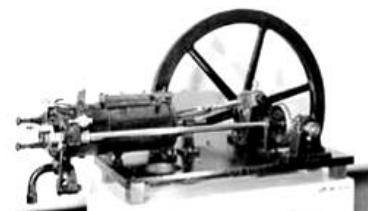


Рис. 5. Музейный экспонат первого четырехтактного ДВС известного немецкого инженера-механика Н.А. Отто [11]

В этой связи в мире активно искали новые виды горючего для ДВС. Некоторые изобретатели пытались применить в качестве газа для ДВС пары жидкого топлива. Еще в 1872 году американский инженер Дж. Брайтон пытался использовать в этом качестве керосин. Однако керосин плохо испарялся и тогда Дж. Брайтон перешёл к более лёгкому нефтепродукту – бензину [10]. Для того, чтобы ДВС на жидким топливом мог успешно конкурировать с газовым двигателем, необходимо было создать специальное устройство для испарения бензина, получения горючей смеси из этого топлива и воздуха и ее подачи в камеру ДВС.

Дальнейший прогресс в мировом двигателестроении был связан с такими весьма известными в современном автомобильном мире именами немецких инженеров-механиков как Готтлиб Даймлер и Вильгельм Майбах (рис. 6), прославившимися созданием в конце 19-го века работоспособного бензинового ДВС [10].



Рис. 6. Известные немецкие изобретатели в области двигателестроения Готтлиб Даймлер и Вильгельм Майбах [10]

Следует указать, что процесс испарения жидкого топлива в первых бензиновых двигателях указанных немецких изобретателей оставлял желать лучшего. Их одноцилиндровый бензиновый ДВС от 1885 года, со-

держащий вертикально установленный в рабочем цилиндре поршень и рядом расположенный упрощенный смеситель-дозатор в его топливной системе, был компактным, легким и одновременно достаточно мощным для того, чтобы двигать пассажирский экипаж. Считается, что именно этот ДВС является прототипом современного **бензинового двигателя** с вертикальными рабочими цилиндрами и топливом, вводимым в его камеру сгорания уже через карбюратор [9].

Заметим, что карбюратором (это слово происходит от французского слова "carburateur" – "смеситель-дозатор" [4]) называется устройство, предназначенное для внешнего смесеобразования горючей смеси (из топлива и воздуха) в топливной системе ДВС, работающего на легком жидким топливе (например, на бензине, керосине и др. видах топлива). Изобретение карбюратора стало важным этапом в двигателестроении. Создателем его считается венгерский инженер Донатан Банки [10]. Только в 1893 году он получил патент на карбюратор с жиклёром, который стал прообразом для всех карбюраторов. Укажем, что Д. Банки в своем патенте предлагал не испарять бензин, а подавать его в рабочий цилиндр в распыленном жиклёром состоянии. Испарение же по его идеи должно протекать в самом цилиндре под действием температуры и давления. Распыливание струи бензина происходило в потоке воздуха, причём количество всасываемого топлива было пропорционально секундному расходу воздуха. Отметим, что в бензиновых карбюраторных ДВС нормальная горючая смесь обычно состоит по массе примерно из 15 частей воздуха и 1 части паров бензина. Двигатель может работать как на обеднённой горючей смеси (пропорция «воздух-топливо» равна 18:1), так и обогащенной смеси (указанная пропорция составляет 12:1) [10, 11].



Рис. 7. Общий вид современного карбюратора для ДВС [10]

Слишком "богатая" или слишком "бедная" топливная смесь вызывает резкое уменьшение скорости ее сгорания в камере ДВС и поэтому такая горючая смесь не может обеспечить нормального протекания процесса ее сгорания. Укажем, что кроме карбюраторного метода смесеобразования для ДВС существует и другой способ подготовки горючей смеси, основанный на впрыске бензина во впускной коллектор или непосредственно в рабочие цилиндры двигателя при помощи распыляющих форсунок (инжектора) [9].

Подытоживая в этом разделе, можно констатировать, что изобретение ДВС было выдающимся событием в истории человечества. Главную заслугу в его изобретении нужно разделить между несколькими людьми: Ж.Э. Ленуаром, Н.А. Отто и Г. Даймлером. Причем, из всех этих людей инженер-механик Н.А. Отто сделал самый значительный вклад (рис. 8) [10].



Рис. 8. Основные создатели первых в мире работоспособных ДВС – бельгийский инженер Ж.Э. Ленуар (слева) и немецкий механик-изобретатель Н.А. Отто (справа) [10, 11]

Двигатель Ж.Э. Ленуара (рис. 3) по сути своей не был ни достаточно мощным, ни достаточно эффективным для того, чтобы приводить, например, автомобиль в движение. Двигатель же Н.А. Отто (рис. 4, 5) обеспечивал все необходимые для этого технические параметры. Поэтому именно немецкий инженер-механик Н.А. Отто является одним из истинных создателей ДВС, в котором химическая энергия используемого в нем жидкого или газообразного углеводородного топлива, сгорающего в рабочей камере высокого давления этого вида тепловой машины, преобразуется в механическую работу быстро вращающегося металлического коленчатого вала двигателя. На рис. 9 представлен общий вид современного мощного ДВС.



Рис. 9. Внешний вид современного поршневого ДВС [12]

Из рис. 3-5 и 9 и данных из [6-12] видно, что как далеко по конструкции и своим техническим характеристикам "ушли" вперед современные ДВС различного типа (например, бензиновые карбюраторные, бензиновые инжекторные, дизельные, газовые, газодизельные и роторно-поршневые [10]) в сравнении с первыми конструкциями двигателей этого вида. Причем, "ушли" в технологии изготовления, эффективности и мощности ДВС, но не по своим не изменившимся до наших дней рабочим тактам ("циклу Отто"), которые так изменили нас и весь наш мир (рис. 10).

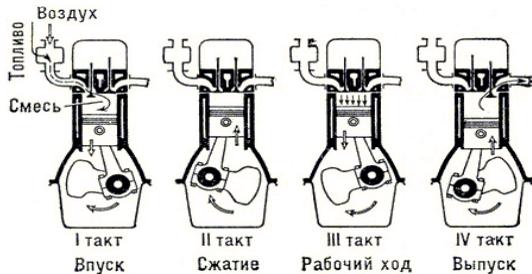


Рис. 10. Схематическое изображение рабочего цикла современного четырехтактного карбюраторного ДВС [12]

Если первые ДВС имели мощность не более 5 л.с. (до 3,7 кВт), то в настоящее время максимальная

мощность четырехтактного карбюраторного ДВС уже составляет до 800 л.с. (до 590 кВт) [12]. Современные авиационные поршневые двигатели с непосредственным впрыском авиабензина и искровым зажиганием их горючей смеси развивают мощность до 1500 л.с. (до 1100 кВт). Заметим, что в конце сгорания горючей смеси давление в рабочем цилиндре карбюраторного ДВС может достигать до 60 атм, а температура – до 2200 °C [12]. Кроме того, рабочий цикл современного карбюраторного ДВС, осуществляемый за 4-е хода поршня диаметром не более 150 мм (при его большем диаметре возрастает склонность к детонации горючей смеси [10]), может быть осуществлен при большой частоте вращения коленчатого вала двигателя (от 3000 до 7000 об/мин). Что касается ДВС гоночных автомобилей и мотоциклов, то их валы могут развивать скорость вращения в 15000 об/мин и более [12].

Важным практическим применением ДВС является их использование, прежде всего, для приведения в движение разных автомобилей. Следует особо подчеркнуть, что энергетическим "сердцем" 99,9 % всех современных автомобилей при их общем количестве в сотни миллионов штук, несмотря на сильное влияние электрификации во многих промышленных отраслях и на автотехнику, по-прежнему остается ДВС [12].

### 3. ИЗОБРЕТЕНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Хотя этот вид двигателя и относится к ДВС, однако учитывая его важность, прогрессивность и широкую распространность в современном обществе, будет разумным и целесообразным выделить нам краткую историю его создания в отдельный раздел. Изобретателем этого типа двигателя оказался выдающийся немецкий инженер-механик Рудольф Дизель (1858-1913 гг.) [13]. Для всех нас, работающих в технической сфере, и по сей день, интересны мысли Р. Дизеля по поводу изобретательской деятельности инженера [13]: *"Изобретение никогда не было лишь продуктом творческого воображения: оно представляет собой результат борьбы между отвлеченной мыслью и материальным миром. Изобретателем истории техники считает не того, кто с той или иной степенью определенности высказывал раньше подобные же мысли и идеи, а того, кто осуществил свою идею, мелькнувшую, может быть, в уме множества других людей"*. Этот творческий человек с широким кругозором и отмеченным выше философским миропониманием технической сферы в конце 19-го столетия предложил новый принцип построения ДВС, базирующийся на законах классической физики. В двигателе Дизеля (*дизельном двигателе*) сильно сжимаемая воспламеняющаяся смесь жидкого углеводородного топлива с воздухом, содержащим по массе в своем составе до 21 % кислорода (окислителя топлива), вспыхивает без инициирующей электрической искры. Напомним, что, например, в современном карбюраторном бензиновом ДВС для инициирования процесса сгорания топлива в рабочем цилиндре двигателя применяется электрическая искра от ввинчиваемой в головку рабочего цилиндра свечи, на коаксиальные металлические электроды которой в определенный момент времени рабочего цикла подается высокое импульсное электрическое напряжение величиной до 15 кВ [12]. Для работающего дизельного двигателя необходимости в подобной электрической ис-

кре нет. Связано это с тем, что при сильном сжатии поршнем цилиндра мелкодисперсной горючей смеси в дизельном ДВС резко повышается ее температура, которая оказывается достаточной для самовоспламенения этой смеси. Принцип построения ДВС, предложенный и запатентованный им в 1892 году (рис. 11), позволил упростить работу ДВС, повысить надежность его функционирования и создать в будущем мощные ДВС для таких транспортных средств как тепловозов, речных и морских надводных и подводных кораблей [12].

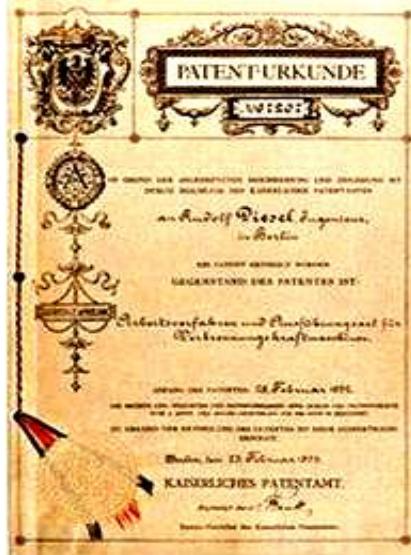


Рис. 11. Патент № 67207 Германии, выданный 23.02.1893 г. выдающемуся немецкому инженеру-механику Р. Дизелю на названный в его честь дизельный двигатель [13]

Начиная в конце 19-го века выдающийся немецкий инженер-механик Р. Дизель свои воплощенные в "металл" оригинальные технические разработки с одноцилиндровых ДВС малой мощности (рис. 12) [13].

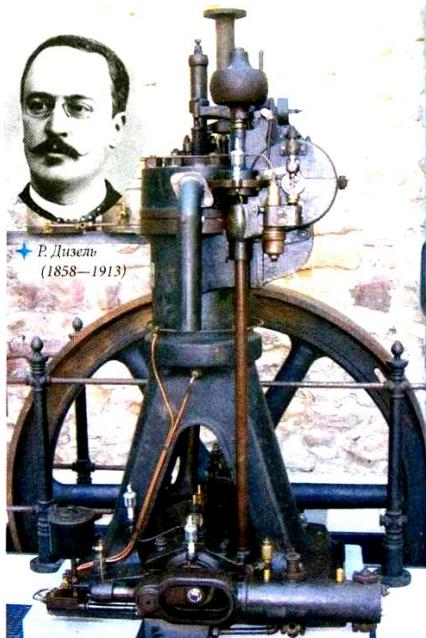


Рис. 12. Первый стационарный одноцилиндровый дизельный двигатель типа DM-12 мощностью 12 л.с. (около 9 кВт) разработки 19-го столетия выдающегося немецкого изобретателя Р. Дизеля (Германия, г. Аугсбург, 1893 год) [13]

В 1897 году Р. Дизелем (рис. 13) был создан двигатель с вертикальным цилиндром мощностью 20 л.с. (около 15 кВт), имевший термический КПД, равный около 29 %. Расход топлива (керосина) в нем составлял до 260 г на 1 л.с. в час [14]. Этот двигатель являлся самым лучшим силовым агрегатом того времени.



Рис. 13. Создатель первого в мире одноцилиндрового дизельного двигателя, выдающийся немецкий ученый, доктор-инженер и изобретатель Рудольф Дизель [14]

Отметим, что сейчас топливо в **дизельном двигателе** впрыскивается в его рабочий цилиндр под высоким давлением (как правило, при его уровне от 100 до 300 атм) через форсунку в строго определенный момент, соответствующий недоходу поршня до своей верхней мертвоточки (рис. 10). Горючая смесь образуется непосредственно в его цилиндре по мере впрыска дизельного топлива. Поэтому дизель является ДВС с внутренним смесеобразованием. Движение поршня внутри цилиндра вызывает нагрев и последующее воспламенение топливовоздушной смеси (коэффициент сжатия при этом в цилиндре может достигать до 21). КПД современного дизельного двигателя достигает до 35 % (при использовании в нем турбонаддува он доходит до 44 %) [13]. Дизельные двигатели являются низкооборотными и характеризуются высоким значением врачающего момента на коленчатом валу двигателя. Дополнительным преимуществом дизельного двигателя является то, что, в отличие от двигателей с принудительным зажиганием их горючей смеси, он при работе не нуждается в электрическом поджиге своей горючей смеси (в автомобильных дизельных двигателях бортовая электрическая система используется только на этапе его первоначального запуска) и, как следствие этого, он менее "боится" попадания в него воды. Заметим, что первые образцы дизельного двигателя в мастерской Р. Дизеля работали на угольной пыли. Позже из-за высоких абразивных свойств как самой этой пыли, так и золы, получающейся при сгорании в рабочем цилиндре угольной пыли, перешли на использование в дизелях тяжелых нефтяных фракций [14]. В 1900 году на Всемирной торгово-промышленной выставке в г. Париже двигатель Дизеля получил Гран-при. С 1908 года Р. Дизель приступил к созданию дизельного двигателя, пригодного для работы в составе автомобиля. Первые попытки такой разработки оказались безуспешными. Трагическая гибель Р. Дизеля на море, произошедшая 29 сентября 1913 года, прервала все его работы.

Дальнейшей работой над дизельным мотором занялся инженер Проспер Леранж, работавший на немецком заводе "Benz & Cie". В 1909 году он получил патент на дизельный двигатель с предкамерой [14]. В 20-е годы 20-го века немецкий инженер Роберт

Бош усовершенствовал для дизеля встроенный топливный насос высокого давления, который широко применяется и в наше время. Эти усовершенствования и открыли "дорогу" **"дизельному двигателю"** на автомобильный рынок. Первый грузовик, оснащенный дизельным двигателем, был выпущен в Германии в 1923 году. Это был 5-ти тонный "Benz 5K3", в котором был установлен 4-х цилиндровый дизельный двигатель с предкамерой объемом 8,8 л [14]. Он развивал мощность до 50 л.с. (около 37 кВт) при скорости вращения вала в 1000 об/мин. Дизельные двигатели получили сейчас широкое распространение в мире и, в первую очередь, на железной дороге и в судостроении. Например, локомотивы (тепловозы), использующие дизельный двигатель, являются основным видом транспорта на неэлектрифицированных участках железной дороги. Они конкурируют с электровозами за счет своей автономности, перевозя при этом, к примеру, в Российской Федерации до 40 % грузов и пассажиров и выполняют до 98 % маневровой работы на дороге [14]. Сейчас редкая модель ДВС представляется на коммерческом рынке двигателей без дизельной модификации. Архивно-исторические данные свидетельствуют о том, что создатель этого силового агрегата Рудольф Дизель шел к своему техническому открытию весьма тернистым путем, упорно преодолевая постоянные трудности и недоверие окружающих. Кстати, разработанная им инженерная теория ДВС стала основой для создания современных двигателей с воспламенением смеси от сжатия – **"дизелей"** [14].

На рис. 14 представлены внешние виды современных дизельных двигателей, широко используемых в качестве силовых агрегатов автомобилей и судов.



Рис. 14. Внешние виды автомобильного (слева без турбонаддува) и судового (справа с турбонаддувом) мощных дизельных двигателей разработки конца 20-го столетия [14, 15]

Для связи времен и поколений отечественных дизелестроителей укажем, что в конце 2011 года в НТУ "ХПИ" прошло торжественное собрание научно-технической общественности, посвященное 100-летию дизелестроения в Украине [16]. Вызвано это было тем закономерным фактом, что история дизелестроения нашей страны неразрывно связана с Харьковским практическим технологическим институтом, основанном в 1885 году, и нынешним его правопреемником НТУ "ХПИ". Именно в стенах этого харьковского высшего учебного заведения была основана украинская школа дизелестроения под научным руководством разработчика первых отечественных дизелей и первого заведующего кафедрой ДВС в ХПИ и ХАИ, д.т.н., проф. В.Т. Цветкова. Здесь следует отметить и тот немаловажный факт, что среди прославив-

шихся выпускников-механиков ХПИ в области авиадвигателей и дизелестроения был основатель и генеральный конструктор широко известного во всем мире Запорожского машиностроительного конструкторского бюро "Прогресс" Александр Георгиевич Ивченко. Отметим, что в настоящее время кафедра ДВС НТУ "ХПИ" под руководством ее нынешнего заведующего, проректора этого университета по науке, лауреата Государственной премии Украины в области науки техники, д.т.н., проф. А.П. Марченко успешно продолжает дальнейшее развитие необходимого нашему обществу двигателестроения в Украине [17].

#### 4. ИЗОБРЕТЕНИЕ РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Неутомимые изобретатели мира продолжали и продолжают искать альтернативу традиционному ДВС. Одним из них оказался выдающийся немецкий механик-самоучка Феликс Генрих Ванкель (1902-1988 гг.) [15, 18]. Еще в молодости Ф.Г. Ванкель (рис. 15) понял, что все четыре такта работы обычного ДВС (впрыск, сжатие, сгорание и выхлоп) можно осуществить при круговом вращении ротора-поршня. В 1934 году он создал первый опытный образец **роторно-поршневого двигателя** (РПД) и получил на него патент [15]. В это время он сконструировал новые клапаны и камеры сгорания для своего экзотического мотора, создал несколько различных вариантов его исполнения и разработал классификацию кинематических схем различных РПД [18]. Понадобились десятилетия для доводки и производства этого типа ДВС.



Рис. 15. Выдающийся немецкий изобретатель современных ДВС роторно-поршневого типа – Феликс Ванкель с трехвершинным ротором своего оригинального двигателя [15]

Только в 1957 году первый РПД был установлен немецкой компанией "NSU Motorenwerke AG" на автомобиль марки "Prinz" [15]. Испытаний этот РПД типа DKM-54 тогда не выдержал, но доказал свою принципиальную работоспособность, открыл направления для своей дальнейшей доработки и продемонстрировал колossalный потенциал "роторников". В чем же заключается принципиальное отличие РПД от обычного ДВС? В том, что в РПД применен вращающийся ротор (поршень), размещенный внутри цилиндра, поверхность которого выполнена по эпирохонде (рис. 16) [15, 18]. Установленный на валу треугольный ротор жестко соединён с зубчатым колесом, которое входит в зацепление с неподвижной шестерней. Ротор с зубчатым колесом как бы обкатывается вокруг этой шестерни. Его (ротора) треугольные грани при этом скользят по внутренней эпирохондальной поверхности цилиндра и отсекают переменные объемы камер сжатия и расширения смеси в рабочем цилиндре РПД.



Рис. 16. Внешний вид роторно-поршневого двигателя Ванкеля с разобранным овальным цилиндром этого ДВС [15]

Подобная конструкция РПД с искровым зажиганием позволяет осуществить 4-х тактный цикл без применения специального механизма газораспределения в цилиндре. Герметизация камер в этом двигателе обеспечивается радиальными и торцевыми уплотнительными пластинами, прижимаемыми к цилиндуру центробежными силами, давлением газа и ленточными пружинами. Смесеобразование, зажигание, смазка, охлаждение и запуск в РПД принципиально такие же, как и у обычного поршневого ДВС [15, 18]. Таким образом, функцию поршня в РПД выполняет трехвершинный ротор, преобразующий силу давления газов от сгорания горючей смеси во вращательное движение эксцентрикового вала. Движение ротора относительно статора (наружного корпуса цилиндра) обеспечивается парой шестерен, одна из которых закреплена на роторе, а вторая на боковой крышки статора (цилиндра). За полный оборот трехвершинного ротора в каждой из камер двигателя совершается полный четырехтактный цикл. Газообмен регулируется вершиной ротора при прохождении ее через впускное и выпускное окна. Крутящий момент в РПД получается в результате действия газовых сил через трехгранный ротор на эксцентрик вала. Повышенный интерес к РПД в 70-х годах прошлого века был вызван их следующими существенными потенциальными преимуществами по сравнению с обычными поршневыми двигателями сравнимого класса по мощности [18]: 1) меньшим на 35-40 % общим количеством деталей; 2) меньшим удельным весом при одинаковых материалах и соответственно габаритным объемом; 3) меньшей стоимостью; 4) плавностью работы в результате отсутствия возвратнопоступательно движущихся частей; 5) возможностью потребления низкооктанового бензина; 6) более низким уровнем шумов и вибраций. Отметим, что автомобилестроительным компаниям США, Японии и ряда европейских стран в результате длительно проделанной ими огромной научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы удалось решить многие сложные технические задачи на пути создания работоспособного надежного РПД и выйти в настоящее время на этап промышленного производства этого типа двигателей [15, 18]. При этом нам не следует забывать и об основных недостатках РПД [18]: 1) неэффективный процесс сгорания горючей смеси в камере цилиндра и связанный с этим повышенный расход топлива и уровень токсичности отработанных газов; 2) высокий расход масла для смазки его трущихся частей; 3) невоз-

можность его выпуска на производственных площадях, предназначенных для производства традиционных ДВС; 4) переход на выпуск РПД требует замены подавляющего большинства технологического оборудования в цехах.

## 5. ИЗОБРЕТЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Считается, что первый работоспособный образец **электрического двигателя** (ЭД) с круговым вращением вала якоря появился в 1834 году. Его создателем является известный российский электротехник Борис Якоби (1801-1874 гг.) [3, 19, 20]. В 1860 году итальянским изобретателем Антонио Пачинотти (1841-1912 гг.) был построен ЭД постоянного электрического тока с коллектором [19, 20]. Принцип работы ЭД заключается во взаимодействии магнитных полей его якоря и статора, содержащих распределенные вдоль их круговых периметров электромагниты (рис. 17).

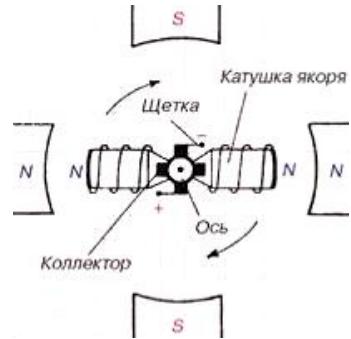


Рис. 17. Упрощенная схема построения и работы ЭД [21]

При подведении электрического тока через графитовые щетки и коллектор к многовитковым катушкам круглого якоря, размещенного на подшипниках внутри статора ЭД, электродинамическое взаимодействие образующихся магнитных полей катушек якоря и ранее существовавшего магнитного поля электромагнитов статора вызывает появление вращающегося момента на валу якоря. Отключение электрического тока катушек якоря ЭД приводит к остановке якоря и соответственно вала двигателя. Укажем, что 1867 год ознаменовался открытием принципа самовозбуждения в электрических машинах, сделанным видным немецким электротехником и изобретателем Вернером Сименсом (1816-1892 гг.). Это дало возможность заменить в ЭД стальные магниты на электромагниты. В 1869 году двигатель Пачинотти был усовершенствован французским изобретателем Зенобом Граммом (1826-1901 гг.), который создал кольцевой якорь из шихтованного железа (из плотно прилегающих друг к другу тонких металлических пластин) [3, 19]. Позже в 1873 году немецкий электротехник Фридрих Хефнер-Альтенек (1845-1904 гг.) данный якорь заменил на барабанный, существенно упростивший конструкцию ЭД и заметно увеличивший его мощность [3, 19]. Важный физико-технический прорыв в области электрических машин был совершен гениальным хорватско-американским электротехником Николой Тесла (1856-1943 гг.), открывшим в 1888 году явление вращающегося магнитного поля [3, 19]. Это привело к созданию им серии многофазных (в большей части двухфазных) электродвигателей. В 1890 году выдающимся немецко-российским электротехником Михаилом Доливо-Добровольским (1862-1919 гг.) был изобр

ретен трехфазный асинхронный ЭД переменного тока, содержащий короткозамкнутую обмотку якоря и распределенные по статору фазные обмотки [19, 20]. Поэтому можно обоснованно говорить о том, что к концу 19-го века в мире появились первые промышленные образцы ЭД. С появлением в 1870 году надежного источника постоянного электрического тока в виде кислотной аккумуляторной батареи их (электродвигатели) сразу стали устанавливать на боевые подводные лодки во многих странах [21]. Далее ЭД нашли широкое применение в машиностроительной и металлообрабатывающей отраслях промышленности, авиационной, ракетной и бытовой технике и на транспорте. На рис. 18 приведен общий вид современного ЭД типа FIMET.



Рис. 18. Внешний вид современного общепромышленного электродвигателя типа FIMET мощностью до 11 кВт [22]

Нам следует констатировать, что одним из важных достижений в области науки и техники конца 19-го века стало изобретение **электродвигателя**, преобразующего электрическую энергию постоянного или переменного тока якоря и статора в механическую энергию быстро вращающегося (до нескольких тысяч оборотов в минуту) металлического вала ЭД. Сейчас это удобное и экономичное электротехническое устройство различной мощности стало важнейшим элементом во всех сферах человеческой деятельности, начиная с производства и заканчивая бытом людей.

## 6. ИЗОБРЕТЕНИЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Газотурбинный двигатель** (ГТД) или как его еще иначе называют **турбореактивный двигатель** (ТРД) является тепловым двигателем, в котором газ сжимается и нагревается, а затем энергия сжатого и разогретого газа преобразуется в механическую работу на осевом валу газовой турбины [23]. В отличие от поршневого двигателя, в ГТД все газодинамические процессы происходят в потоке быстро движущихся газов. Сжатый атмосферный воздух из компрессора высокого давления поступает в камеру сгорания ГТД (рис. 19), в которую подается топливо. Сгорая, это топливо образует большое количество газообразных продуктов сгорания, врачающихся под высоким давлением турбину ГТД и вырывающихся из его сопла.

В качестве топлива ГТД (рис. 20) могут использоваться любые горючие вещества, которые можно диспергировать: бензин, керосин, дизельное топливо, мазут, природный газ, судовое топливо, спирт и измельченный уголь. ГТД (ТРД) имеют самую большую удельную мощность среди ДВС (до 6 кВт/кг) [23].

Турбина ГТД реактивного самолета вращается со скоростью до  $10^4$  об/мин [23]. Чем выше в ГТД температура сгорания его топлива, тем выше КПД такого двигателя.

Поэтому в ГТД применяются жаропрочные материалы (спецстали, никель, керамика и др.), а его детали в горячей зоне оснащены системами охлаждения и содержат термобарьерные покрытия. На боевых сверхзвуковых самолетах между турбиной и соплом ГТД обычно устанавливается форсажная камера (рис. 21), в которой сжигается дополнительное горючее.

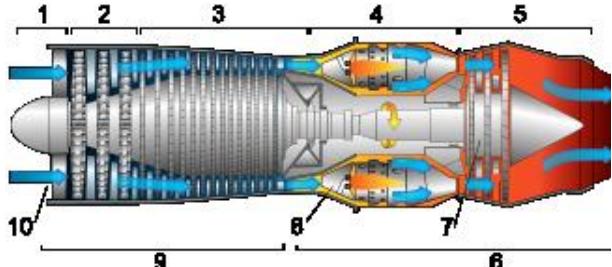


Рис. 19. Схематическое построение газотурбинного двигателя в его продольном разрезе (1 – заборник воздуха; 2 – компрессор низкого давления; 3 – компрессор высокого давления; 4 – камера сгорания; 5 – расширитель рабочего тела в турбине и сопле; 6 – горячая зона; 7 – турбина; 8 – зона входа первичного воздуха в камеру сгорания; 9 – холодная зона; 10 – входное устройство воздухозаборника) [23]

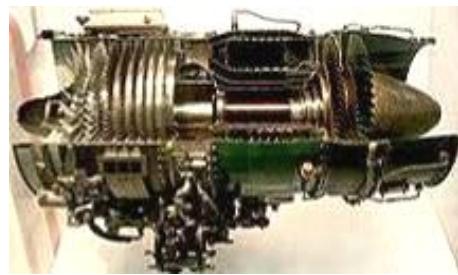


Рис. 20. Внешний вид американского турбореактивного двигателя типа GEJ85 (в продольном разрезе) производства компании "General Electric" (США) [23]



Рис. 21. Форсажная камера американского турбореактивного двигателя типа GEJ79 (вид со стороны сопла двигателя) производства компании "General Electric" (США) [23]

Из данных рис. 21 видно, что в торце форсажной камеры ТРД находится стабилизатор горения диспергированного горючего с установленными на нём топливными форсунками, за которым находится турбина рассматриваемого двигателя. Применение форсажной камеры обеспечивает увеличение тяги в ГТД до 50 %, но расход топлива при этом резко возрастает. Отметим, что ТРД большинства боевых самолётов, летающих на сверхзвуковых скоростях, оборудуются регулирующими направление вектора тяги соплами (рис. 22). Укажем и то, что для реактивных самолетов мира 4-го поколения (например, для МиГ-29, Су-27 и F-16) температура сжатого газа перед турбиной ГТД (например, для типа РД-33, АЛ-31Ф и F-404) составляет до  $1400^{\circ}\text{C}$ , а степень его сжатия достигает 25 [23].



Рис. 22. Внешний вид регулируемого сопла советского форсированного турбореактивного двигателя типа АЛ-21 [23]

С учетом огромных термодинамических нагрузок, действующих на элементы ГТД, рабочие лопатки его турбины, начиная с 4-го поколения, выполняются из охлаждаемых монокристаллических сплавов [23].

## 7. ИЗОБРЕТЕНИЕ ТУРБОВИНТОВОГО И ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНОГО ДВИГАТЕЛЕЙ

В *турбовинтовом двигателе* (ТВД), являющемся одной из разновидностью ГТД, основное тяговое усилие обеспечивает впереди расположенный воздушный многолопастный винт (рис. 23), соединённый через редуктор с осевым валом турбокомпрессора ТВД [23]. ТВД более экономичны на малых скоростях полёта чем ГТД и поэтому они широко используются для самолётов, имеющих большую грузоподъёмность и дальность полёта. При этом крейсерская скорость самолётов гражданской и военной авиации, оснащённых ТВД, составляет от 600 до 800 км/ч [23]. С ростом скорости полёта самолёта эффективность воздушного винта в ТВД уменьшается. В этой связи чаще всего ТВД применяется в авиации, обслуживающей местные воздушные перевозки людей и грузов.



Рис. 23. Внешний вид российского натурного образца современного мощного турбовинтового двигателя [23]

*Турбовентиляторный реактивный двигатель* (ТВРД) является подвидом ТРД с высокой степенью двухконтурности. В ТВРД (рис. 24) компрессор низкого давления преобразуется в вентилятор, отличающийся от подобного компрессора меньшим числом ступеней и большим диаметром. В ТВРД горячая струя газов практически не смешивается с холодной.

Главным достоинством ТВРД является их высокая экономичность. Основные недостатки – большие масса и габариты [23]. Область применения таких двигателей – дальне- и среднемагистральные коммерческие авиалайнеры и военно-транспортная авиация.

## 8. ИЗОБРЕТЕНИЕ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ракетный двигатель (РД) является на сегодня практически единственным типом двигателя, хорошо освоенным специалистами ракетно-космической отрасли для вывода полезной нагрузки на орбиту искус-

ственных спутников Земли и применения в условиях безвоздушного космического пространства [24]. Сила тяги в РД (рис. 25) возникает в результате преобразования исходной энергии топлива в кинетическую энергию реактивной струи и самого рабочего тела ракеты. В зависимости от вида энергии, преобразующейся в кинетическую энергию реактивной струи и рабочего тела, различают химические ракетные двигатели, ядерные (термоядерные) ракетные двигатели и электрические ракетные двигатели [24]. Наиболее распространенным химическим РД является **жидкостной ракетный двигатель** (ЖРД), в котором на основе экзотермической химической реакции горючего и окислителя, именуемых вместе топливом, образующиеся продукты их сгорания нагреваются в камере сгорания РД до высоких температур и при своем расширении разгоняются в сверхзвуковом сопле этого РД и далее с огромной скоростью истекают из него.



Рис. 24. Внешний вид американского турбовентиляторного реактивного двигателя типа CFM56-5C производства компании "General Electric" (США) [23]

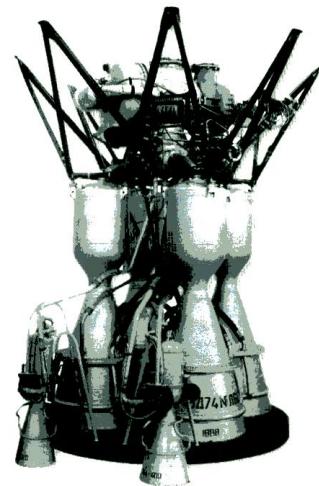


Рис. 25. Советский жидкостной ракетный двигатель типа РД-107 для космического корабля "Восток", выведшего на околоземную орбиту в 1957 году первый в истории Земли искусственный спутник и в 1961 году первого в мире человека в космос [1, 24]

Создателями первых работоспособных ЖРД оказались выдающиеся немецкие и советские конструкторы в лице Вернера фон Брауна и В.П. Глушко (рис. 26) [1, 24]. Следует указать, что созданию совершенных образцов РД предшествовала огромная работа многочисленных коллективов двигателестроителей. Отметим, что в настоящее время для ЖРД мощных

ракетоносителей в качестве горючего используется токсичный гептил, а в виде его окислителя – тетраоксид диазота ( $N_2O_4$ ) [24]. На рис. 27 запечатлен старт американского многоразового космического корабля "Шаттл", использующего боковые твердотопливные ракетные двигатели (ТТРД) и маршевые ЖРД [24].



Рис. 26. Выдающийся конструктор ракетных двигателей, академик АН СССР Валентин Петрович Глушко [25]

Укажем, что удельный импульс для ЖРД (например, для типа РД-170) достигает 4500 с, а тяга составляет свыше 800 тс [24]. По совокупности этих свойств ЖРД предпочтительны в качестве маршевых двигателей ракетоносителей космических аппаратов.



Рис. 27. Старт с космодрома многоразового космического корабля "Шаттл" с тягой ТТРД свыше 1300 тс (США) [24]

На рис. 28 приведен предназначенный для полётов в земной стрatosфере новый летательный аппарат (ЛА) США, работающий на скоростях до 5М (до 5500 км/ч) и имеющий прямоточный воздушный РД [25].



Рис. 28. Гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель, установленный на экспериментальном гиперзвуковом летательном аппарате NASA типа X-43 (США) [25]

## 9. ИЗОБРЕТЕНИЕ ЯДЕРНОГО И ТЕРМОЯДЕРНОГО РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Ядерный (ЯРД) или термоядерный (ТАЯРД) ракетные двигатели** являются разновидностью РД, которые используют энергию деления или синтеза ядер атомов для создания в них реактивной тяги [26]. Они бывают реактивными (нагрев рабочего тела осуществляется в ядерном (термоядерном) реакторе, а вывод перегретого в них газа – через сопло РД) и импульсными (нагрев рабочего тела выполняется за счет ядерных взрывов супермалой мощности) [26]. Поэтому

традиционный ЯРД (рис. 29) представляет собой компактную конструкцию, состоящую из малогабаритного ядерного реактора, системы подачи рабочего тела-газа (как правило, водорода [26]) и сопла РД.

Согласно [26] существуют различные конструкции ЯРД (твёрдофазные, жидкофазные и газофазные), имеющие различное агрегатное состояние ядерного топлива в активной зоне их реакторов – твёрдое, расплав или высокотемпературный газ (либо плазму). ЯРД активно разрабатывались и испытывались с середины 1950-х годов как в СССР (например, типа РД-0410), так и в США (например, типа NERVA). Подобные исследования ведутся и в настоящее время [26]. Укажем, что основу ЯРД типа РД-0410 с тягой в 3,6 тс составлял ядерный реактор типа ИР-100 с топливными элементами из твердого раствора карбида урана и карбида циркония [26]. Температура его водорода достигала 3000 К при мощности реактора до 170 МВт.

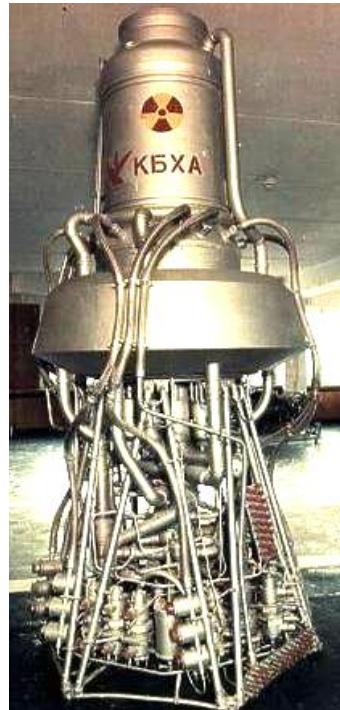


Рис. 29. Первый советский ядерный ракетный двигатель типа РД-0410, примененный в космических аппаратах [26]

## 10. ИЗОБРЕТЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В **электрических ракетных двигателях** (ЭРД) в качестве источника энергии для создания реактивной тяги используется электроэнергия, преобразуемая в кинетическую энергию не- и заряженных частиц [27]. ЭРД подразделяются на следующие основные виды: электростатические (плазменные и ионные), электротермические (электронагревные и электродуговые) и сильноточные (магнитоплазменные с собственным и внешним магнитным полем). Остановимся в дальнейшем вкратце лишь на плазменных и ионных ЭРД.

**Плазменные двигатели.** Работа этих ЭРД базируется на ускорении заряженных частиц, находящихся в квазинейтральной плазме. Поэтому рабочим телом здесь служит не сгорающее топливо, как в реактивном двигателе или ДВС, а разогнанный магнитным полем до огромных скоростей поток заряженных ионов [28]. Источником ионов в плазменном двигателе (ПД) служит

газ (как правило, им является аргон или водород). Этот газ подается в отсек ионизации ПД для получения холодной плазмы, которая разогревается в следующем его отсеке посредством ионного циклотронного резонансного нагрева. После такого нагрева высокоэнергетическая плазма подается в магнитное сопло ПД, где она вначале формируется посредством магнитного поля в направленный поток, разгоняется и затем выбрасывается в окружающую среду (рис. 30).

Основным достоинством ПД космического аппарата является его долговременное автономное функционирование в открытом космосе при относительно небольшом расходе рабочего тела [27]. ПД в космосе обеспечивается энергией от аккумуляторов, радиоизотопных генераторов или солнечных батарей космического аппарата. Сейчас такие российские и американские ПД развиваются пока слабую тягу (от 30 до 50 мН или от 3 до 5 гс). Поэтому они используются только для корректировки спутниковых орбит вокруг Земли либо для медленного, но длительного ускорения небольших аппаратов непосредственно в космическом пространстве. На рис. 31 приведен общий вид советского ПД, разработанного в 1970-х годах [27].

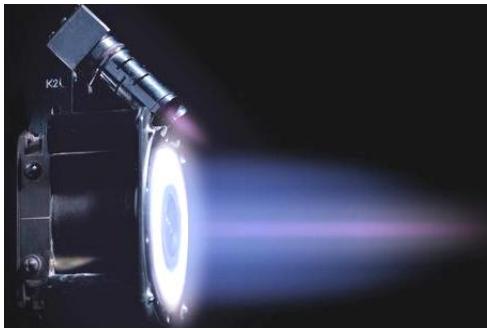


Рис. 30. Внешний вид реактивной плазменной струи при работе в вакууме плазменного ракетного двигателя [28]



Рис. 31. Электроракетный ПД, созданный в 1971 году в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (экспонат-установка политехнического музея, Москва) [27, 28]

Первые в мире успешные космические испытания ПД типа "Эол-1" были осуществлены в СССР в 1974 году [28]. В 1994 году ПД типа СПД-100 (при расходности его плазменного пучка до  $\pm 45^\circ$  и КПД в 50 %) был оснащен российский спутник связи "Галс-1" [28]. В качестве другого реального примера приме-

нения ПД в космосе укажем, что этот вид ЭРД типа PPS-1350, разработанный российским ОКБ "Факел", в 2003 году вывел в открытое космическое пространство с околоземной орбиты европейский зонд SMART-1, ставший в 2005 году искусственным спутником Луны [28].

**Ионные двигатели.** "Пионером" ионных двигателей (ИД) в мире считается американский ученый Г. Кауфман [28]. Работа ИД основывается на ускорении заряженных частиц, присутствующих в их униполярном пучке. В ИД в качестве рабочего тела может использоваться ксенон или ртуть. Принцип работы ИД, построенного по схеме Кауфмана, поясняет рис. 32. В этой схеме вначале используется ионизация рабочего тела (газа) дуговым разрядом, а затем образовавшиеся в ионизаторе ионы разгоняются электростатическим полем в ионно-оптической системе этого двигателя.



Рис. 32. Упрощенная схема построения и работы ИД [28]

Отметим, что ИД, также как и ПД, имеют на сегодня небольшую реактивную тягу, составляющую от 50 до 100 мН или от 5 до 10 гс [28]. Такой тяги недостаточно для перемещения даже небольшого ЛА в атмосфере Земли. Однако в открытом космосе, в вакууме которого практически отсутствует сопротивление, ИД при длительном разгоне космического аппарата может обеспечить ему достижение значительных скоростей. На рис. 33 представлен внешний вид действующих образцов современных российских ИД [28].



Рис. 33. Внешний вид малогабаритных действующих образцов современных российских ионных ракетных двигателей, используемых в космических исследованиях [28]

На рис. 30 и 33 хорошо видны катодные трубы, направленные в сторону сопла рассматриваемых ЭРД и предназначенные для нейтрализации электронаридов в плазменно-ионных пучках ПД и ИД. На рис. 34 показан общий вид американского ИД типа NSTAR.

На рис. 35 приведен внешний вид реактивной ионной струи от американского ИД типа NSTAR в период его испытания на Земле в вакуумной камере.



Рис. 34. Внешний вид современного американского ионного ракетного двигателя типа NSTAR, установленного в 1998 году NASA на космический зонд Deep Space 1 (США) [28]

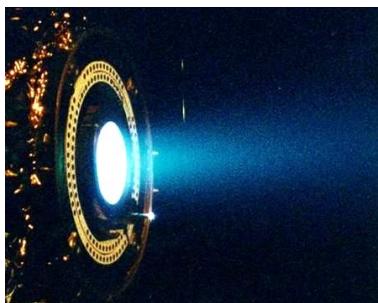


Рис. 35. Предстартовые испытания в вакууме американского ионного ракетного двигателя типа NSTAR, установленного на космическом зонде Deep Space 1 (США, 1998 год) [28]

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скляренко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.
2. Климов А.А. Большая книга знаний. – Харьков: Веста, 2010. – 160 с.
3. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Харьков: Изд-во "НТМТ", 2011. – 311 с.
4. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
5. [http://www.3dnews.ru/editorial/dvizhimie\\_parom\\_istoriya\\_parovih\\_mashin](http://www.3dnews.ru/editorial/dvizhimie_parom_istoriya_parovih_mashin).
6. <http://www.engine-market.ua/page/history>
7. <http://www.avto-okey.ru/article9.html>
8. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Лебон\\_Филипп](http://ru.wikipedia.org/wiki/Лебон_Филипп)
9. [http://1interesnoe.info/2011/01/energeticheskie\\_ustanovki\\_dvigateli\\_vnutrennego\\_sgoraniya](http://1interesnoe.info/2011/01/energeticheskie_ustanovki_dvigateli_vnutrennego_sgoraniya).
10. [http://ru.wikipedia.org/wiki/История\\_создания\\_двигателей\\_внутреннего\\_сгорания](http://ru.wikipedia.org/wiki/История_создания_двигателей_внутреннего_сгорания).
11. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Отто\\_Николаус](http://ru.wikipedia.org/wiki/Отто_Николаус).
12. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Двигатель\\_внутреннего\\_сгорания](http://ru.wikipedia.org/wiki/Двигатель_внутреннего_сгорания).
13. <http://www.dizelist.ru/index.php/istoriya-sozdaniya-biografiya-izobretatelya/14-biografiya-rudolfa-dizelya>.
14. [http://www.avto.ru/review/post\\_11375.html](http://www.avto.ru/review/post_11375.html).
15. [http://amastercar.ru/articles/engine\\_car\\_48.shtml](http://amastercar.ru/articles/engine_car_48.shtml).
16. Самойленко Д. 100 років дизелебудування // Газета "Політехнік" №23 (2373) від 30 листопада 2011 р., 1 с.
17. Марченко А.П., Товажнянський Л.Л., Шеховцов А.Ф. та інші. Двигуни внутрішнього згорання: Том 1-6. – Харків: Прапор, 2004.
18. [http://gizmod.ru/2009/06/23/motor\\_vankelja](http://gizmod.ru/2009/06/23/motor_vankelja).
19. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
20. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 5: Электротехника // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №6. – С. 3-14.
21. [http://www.submarine.itishistory.ru/1\\_lodka\\_2.php](http://www.submarine.itishistory.ru/1_lodka_2.php).
22. <http://www.promelmach.ru/pages/fimet/catalog/1m.pdf>.
23. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Газотурбінний\\_двигатель](http://ru.wikipedia.org/wiki/Газотурбінний_двигатель).
24. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Ракетний\\_двигатель](http://ru.wikipedia.org/wiki/Ракетний_двигатель).
25. <http://vakul.ru/istoriya-aviacii/nachalo-reaktivnogo-veka>.
26. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерний\\_ракетний\\_двигатель](http://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерний_ракетний_двигатель).
27. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Електрический\\_ракетний\\_двигатель](http://ru.wikipedia.org/wiki/Електрический_ракетний_двигатель).
28. <http://galspace.spb.ru/orbita/ximdv.htm>.

**Bibliography (transliterated):** 1. Sklyarenko V.M., Syadro V.V. Otkrytiya i izobreteniya. – Har'kov: Vesta, 2009. – 144 s. 2. Klimov A.A. Bol'shaya kniga znanij. – Har'kov: Vesta, 2010. – 160 s. 3. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihsya dostizhenij v nauke i tekhnike: Monografija v 2-h tomah. Tom 1. – Har'kov: Izd-vo "NTMT", 2011. – 311 s. 4. Bol'shoj illyustrirovannyj slovar' inostrannyh slov. - M.: Russkie slovari, 2004. - 957 s. 5. [http://www.3dnews.ru/editorial/dvizhimie\\_parom\\_istoriya\\_parovih\\_mashin](http://www.3dnews.ru/editorial/dvizhimie_parom_istoriya_parovih_mashin). 6. <http://www.engine-market.ua/page/history>. 7. <http://www.avto-okey.ru/article9.html>. 8. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Lebon\\_Filipp](http://ru.wikipedia.org/wiki/Lebon_Filipp). 9. [http://1interesnoe.info/2011/01/energeticheskie\\_ustanovki\\_dvigateli\\_vnutrennego\\_sgoraniya](http://1interesnoe.info/2011/01/energeticheskie_ustanovki_dvigateli_vnutrennego_sgoraniya). 10. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Istoriya\\_sozdaniya\\_dvigatelej\\_vnutrennego\\_sgoraniya](http://ru.wikipedia.org/wiki/Istoriya_sozdaniya_dvigatelej_vnutrennego_sgoraniya). 11. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Otto\\_Nikolaus](http://ru.wikipedia.org/wiki/Otto_Nikolaus). 12. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Dvigatel'\\_vnutrennego\\_sgoraniya](http://ru.wikipedia.org/wiki/Dvigatel'_vnutrennego_sgoraniya). 13. <http://www.dizelist.ru/index.php/istoriya-sozdaniya-biografiya-izobretatelya/14-biografiya-rudolfa-dizelya>. 14. [http://www.avto.ru/review/post\\_11375.html](http://www.avto.ru/review/post_11375.html). 15. [http://amastercar.ru/articles/engine\\_car\\_48.shtml](http://amastercar.ru/articles/engine_car_48.shtml). 16. Samoilenco D. 100 rokiv dizelebuduvannya // Gazeta "Politehnik" №23 (2373) vid 30 listopada 2011 r., 1 s. 17. Marchenko A.P., Tovazhnyans'kij LL., Shehovcov A.F. ta inshi. Dviguni vnutrishn'ogo zgorannya: Tom 1-6. – Harkiv: Prapor, 2004. 18. [http://gizmod.ru/2009/06/23/motor\\_vankelja](http://gizmod.ru/2009/06/23/motor_vankelja). 19. Hramov Yu.A. Istoriya fiziki. – Kiev: Feniks, 2006. – 1176 s. 20. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihsya dostizhenij v nauke i tekhnike. Chast' 5: 'Elektrotehnika' // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – №6. – S. 3-14. 21. [http://www.submarine.itishistory.ru/1\\_lodka\\_2.php](http://www.submarine.itishistory.ru/1_lodka_2.php). 22. <http://www.promelmach.ru/pages/fimet/catalog/1m.pdf>. 23. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Gazoturbinnij\\_dvigatel](http://ru.wikipedia.org/wiki/Gazoturbinnij_dvigatel). 24. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Raketnyj\\_dvigatel](http://ru.wikipedia.org/wiki/Raketnyj_dvigatel). 25. <http://vakul.ru/istoriya-aviacii/nachalo-reaktivnogo-veka>. 26. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Yadernyj\\_raketnyj\\_dvigatel](http://ru.wikipedia.org/wiki/Yadernyj_raketnyj_dvigatel). 27. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Elektricheskij\\_raketnyj\\_dvigatel](http://ru.wikipedia.org/wiki/Elektricheskij_raketnyj_dvigatel). 28. <http://galspace.spb.ru/orbita/ximdv.htm>.

Поступила 30.03.2012

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния" НТУ "ХПІ"  
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 14: Invention of engines.

A brief scientific essay on the history of invention of various-kind engines is presented, they having become the "power heart" of all transportation means on our planet.

**Key words – history, invention of engines, transport.**

## ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЛАНЕТ

*Розігрітий розплав ядер планет і Сонця є основою їх постійних магнітних полів, які у взаємодію з великомасивним магнітним полем Галактики обумовлюють дію їх динамо-механізмів, які на основі швидкості обертання планет і Сонця навколо їх осей в галактичному магнітному просторі забезпечують появу змінних магнітних полів планет сонячної системи.*

*Разогретый расплав ядер планет и Солнца является основой их постоянных магнитных полей, которые во взаимодействии с крупномасивным магнитным полем Галактики обуславливают действие их динамо-механизмов, которые на основе скорости вращения планет и Солнца вокруг их осей в галактическом магнитном пространстве обеспечивают появление переменных магнитных полей планет солнечной системы.*

Недавно все зарубежные СМИ выступили с сенсационным заявлением: Земля вообще может лишиться магнитного поля! И произойдет это не через тысячи лет, а уже в ближайшие несколько лет... и даже приводится дата 2050 года, когда наступит конец света и Север станет югом, юг – севером, а при инверсии магнитного поля все живое на планете погибнет – такую жуткую картину рисуют ученые. Ученые свои догадки строят на собранных материалах палеомагнитологов, доказывающих возможность инверсии магнитного поля Земли. Палеомагнитологи при определении направления магнитной поляризации пород вулканического происхождения ошибаются, так как не учитывают направленность, в какую именно сторону происходила течь, извергаемая из недр Земли, уже намагниченная лава. На этих ошибочных сведениях и приводятся доказательства, что Южный магнитный полюс триста лет назад покинул свое "насажденное" место в Антарктиде и вышел на просторы Индийского океана. А Северный, описав за четыре столетия дугу длиной в 1100 км по арктическим канадским островам, теперь с все возрастающей скоростью (с 10 км/год в 70-х годах до 40 км/год в 2002-м) движется в нашу Сибирь и на северные российские просторы он прибудет лет через сорок. Но это еще не катастрофа. Так, во всяком случае, считают некоторые ученые и что на этом полюсы не остановятся. Они могут "разбежаться" так, что произойдет магнитная переполюсовка нашей планеты. Когда это произойдет? Датские и французские ученые утверждают: уже через несколько десятков лет. Правда, оптимисты из других стран предполагают, что процесс может продлиться еще несколько тысяч лет. Такой большой разброс в прогнозах не случаен: ведь полюсы могут сбавить скорость перемещения или вовсе остановиться, так, во всяком случае, они надеются. Самый худший вариант развития событий, как такое утверждают датские и французские ученые, если магнитное поле вообще исчезнет уже через несколько десятков лет. Может ли исчезнуть магнитное поле Земли, если Земля все еще продолжает "вертеться"? Цель статьи: показать более правдоподобную гипотезу о структуре строения магнитного поля Земли и показать, что домыслы и предсказания о возможной инверсии магнитного поля Земли, как правило, основываются на незнании творений Создателя, а творения Создателя настолько просты, что в это очень сложно поверить.

### МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ ПЛАНЕТ

К примеру, если намагниченное тело нагревать? Конечно, всем известно, что оно при нагревании размагничивается. При нагревании в теле увеличивается скорость движения его молекул и атомов, при этом нарушается дипольно-молекулярная структура построения вещества, которая и определяет наличие напряженности в теле. Что же происходит с ядром Земли, которое имеет температуру выше миллиона градусов? При такой температуре Ядро должно быть размагниченным и его электроны при сверх большой температуре обретают огромную скорость движения, которая позволяет им срываться с орбит, на которых они врачаются вокруг своих атомов, и, вместе с продуктами распада термоядерных реакций, перелетают в другую зону, в зону жидкой плазменной магмы, что находится вокруг ядра. Перелетев, электроны и продукты распада сообщают магме свою кинетическую энергию и тем способствуют дополнительному ее нагреву. К тому же, вращающуюся в космосе Землю, следует рассматривать как сосуд, заполненного жидким расплавом магмы, которая при наличии в жидкой магме межмолекулярного трения и вязкости, что приводит при вращении Земли к некоторому инерционному отставанию магмы от скорости вращения Земли. Также известно, что источником магнетизма, согласно классической теории электромагнитных явлений, являются электрические макро- и микротоки. Поскольку все микроструктурные элементы вещества: электроны, протоны и нейтроны обладают магнитными моментами, то и любые их комбинации, атомные ядра и электронные оболочки и комбинации их комбинаций, то есть атомы, молекулы и макроскопические тела, могут в принципе быть источниками магнетизма. Существенное влияние на магнитные свойства вещества оказывают также внутренние взаимодействия (электрической и магнитной природы) между атомными магнитными моментами. В некоторых случаях благодаря этим взаимодействиям, судя по всему, энергетически более выгодно, чтобы в веществе существовал при изотермическом уравновешенном процессе самопроизвольный (не зависящий от внешнего поля) атомный магнитный порядок. Таким образом, ядро, лишаясь большого количества электронов, естественно, становится положительно заряженным, что соответствует напряженности поля  $S'$ , так как законы классической электродинамики допускают существование частиц с одним магнитным полюсом магнитной монополей и дают для них определенные уравнения поля и уравнения

движения. "Космос же обладает крупномасштабным магнитным полем  $H'$ ", охватывающим всю Галактику и параллельно ее плоскости. Магнитное поле Галактики в принципе формируется так же, как и в звездах, за счет усиления магнитного поля динамо-механизмом, черпающим в данном случае энергию из дифференциального вращения Галактики. В отличие от Солнца и звезд, где область формирования скрыта глубоко в непрозрачных недрах конвективной зоны, вещества Галактики достаточно прозрачно, чтобы все "шестерни" механизма были доступны наблюдению. Жаль только, что из-за огромных масштабов Галактики характерное время усиления поля 108 лет, т.е. очень велико, чтобы надеяться увидеть, как поменяется под действием этого механизма" [1]. Теперь для примера рассмотрим предположение, что не Земля вращается в галактической напряженности с полем  $N'$ , а Галактика вращается вокруг Земли. Поскольку по факту Земля вращается в космическом пространстве, а, по данным исследователей, Земля имеет постоянное магнитное поле, то следует рассматривать процесс возникновения магнитного поля в целом. Известно, что вокруг ядра Земли, находится в расплавленном виде плазма магмы, которая, как и всякая жидкость, во вращающемся сосуде, имеет инерционное запаздывание, отставание в движении. Также известно, движущаяся плазма, вызывает силы трения между литосферой и магмой, а также между ядром Земли и плазмой магмы, что приводит к замедлению скорости вращения Земли на 0,002 сек. каждого столетия. Плазма магмы, являясь токопроводящей средой, может быть представлена, как замкнутый проводник соленоида, который инерционно запаздывает в движении от вращения Земли, и как бы обратно медленно вращается по часовой стрелке, но при этом расположено между двумя магнитными полями: между полем  $S'$  ядра Земли и полем  $N'$  космоса, что, по нашему условию, полностью соответствует факту вращения Земли в космическом пространстве. Эти два магнитные поля наводят на проводник-плазму магмы индуцированную ЭДС, что согласно правила Ленца - "направление индуцированной ЭДС всегда таково, что вызванный ею ток и его магнитное поле имеют такое направление, что стремятся препятствовать причине, порождающей эту индуцированную ЭДС" [2, с. 178]. Поскольку, по нашему допущению, магнитное поле космического пространства вращается вокруг Земли по часовой стрелке, то индуцированный ток в проводнике-плазме магмы, согласно правилу Ленца, имеет направление против часовой стрелки, что соответствует течению индуцированного тока с направлением соответствующим фактическому направлению вращения Земли. Применяя правило правой руки, где мысленно располагаем правую руку в магнитном поле вдоль оси вращения Земли, т.е. вдоль проводника-плазмы магмы, так сказать, предполагаемой нами магму Земли в виде катушки соленоида, при этом вращающейся по часовой стрелке, так, чтобы магнитные линии, выходящие из северного полюса  $N'$  космоса, входили в ладонь, а большой отогнутый палец совпадал с направлением движения проводника-плазмы магмы, вращающейся по часовой стрелке, то четыре вытянутых пальца будут показывать направление индуцированной ЭДС в проводнике-плазме магмы, что будет соответствовать магнитной напряженности в проводнике, представленного нами, в

виде соленоида с полюсом  $N$  [2, с. 174]. Представлять расплав магмы в виде соленоида нам позволяют центробежные силы инерции вращения Земли, которые своим стремлением сил вращения превращают магму в вид крутящегося катушки-веретено с направлением растяжения магмы в плоскости экватора по радиусу вращения Земли. Таким образом, индуцированный ток течет по указанному направлению вытянутых пальцев руки, по магме сверху от полюса  $S$ , что соответствует географическому земному северному полюсу, к полюсу  $N$ , т.е. к географическому южному полюсу, и поэтому магнитное поле  $N-S$  Земли является исключительно условной и переменной принадлежностью плазмы магмы Земли, но не принадлежностью ядра, а является производной величиной, зависящей от вращения поля  $S'$  ядра и поля  $N'$  космоса. При этом Ядро Земли, в связи с его нагревом, Ядро, как и прежде до появления в магме индуцированного тока, продолжит соответствовать магнитной напряженности монополя  $S'$ . Из этого следует, что направление напряженности магнитного поля Земли зависит только от направления вращения Земли вокруг оси и направления движения индуцированного тока в плазме магмы, и никакой инверсии магнитного поля, в таком случае, не предвидится, при условии, если Земля, конечно, не поменяет направление вращения вокруг своей оси. В связи с выше изложенным объяснением, если проводить аналогию действия магнитных полей Солнца и Земли, то можно смело утверждать, что инверсии магнитного поля Солнца, которую как бы определили учёные, нет и процесс связан лишь с вращением самого Солнца в плоскости переворачивания его оси вращения, с циклом переворачивания в 22 года, так Солнце, кроме его вращения вокруг оси, оно еще вращается своей географической осью в плоскости вращения оси или, как говорят в народе, делает кульбиты через свою ось с циклом в 22 года. Что же касается магнитного поля Земли, то следует рассмотреть еще одно явление, связанное с воздействием инерционных сил вращения Земли: центробежной и центростремительной. Всем известно, в результате воздействия центробежной силы, земной шар имеет вид с несколько приплюснутыми поверхностями в зоне Северного и Южного географических полюсов. Причиной тому служит жидкая и тяжелая по своей массе магма. Жидкая магма под действием инерционных центробежных сил, преодолевая центростремительные силы, постепенно смещается от географических полюсов в сторону экватора. С действием же центростремительной силы ядро Земли принимает эллиптическую форму, у которой большая ось эллипсоидного ядра имеет направление вдоль оси вращения Земли. Взаимодействие ядра Земли, и его большой эллиптической оси, ось которого может наклоняться в сторону наибольшего притяжения или отталкивания магнитными полями, намагниченными индуцированной ЭДС плазмы магмы и, насыщенной индуцированными зарядами, поверхности Земли, а также смещениями тектонических литосферных плит Земли; что влияет на изменение угла склонения геомагнитного поля. Смещение геомагнитных полюсов вдоль оси вращения Земли и величина угла наклонения геомагнитного поля зависят от многих факторов: от силы воздействия магнитного поля космического пространства, от магнитных бурь, от вихревых токов в ядре, разогревающих железную массу ядра, и

особенно от количества и скорости термоядерного синтеза, протекающего в ядре и нагревающего тело ядра и магмы, и др. Нагрев разжигает железную массу ядра и, следовательно, влияет на увеличение длины большой оси эллипсоидной формы ядра, и ее наклон, что способствует перемещению массы плазменной магмы вдоль оси вращения Земли, сближающей геомагнитные полюса и отдаляющей от географических полюсов, что приводит к изменению параметров геомагнитного поля.

### МАГНЕТИЗМ ПЛАНЕТ ГИГАНТОВ

Из вышеизложенного процесса образования магнитного поля Земли известно, что направление напряженности производного магнитного поля зависит от направления вращения планеты. К этому следует добавить, что и производные магнитные поля планет гигантов солнечной системы также зависят от направления вращения планет вокруг своей оси. Однако такое заявление у многих исследователей Космоса вызовет крайнее удивление, так как действие направления напряженности производных магнитных полей большинства планет гигантов, при одинаковом направлении вращения планет гигантов и Земли вокруг своих осей, противоположно направлению производной магнитной напряженности Земли, что, казалось бы, совершенно не соотносится с выше предлагаемой теорией динамомеханизма образования производного магнитного поля Земли. Все так бы и случилось, если бы не одно "НО". Чтобы подтвердить "НО", следует заметить, что у планет-гигантов нет ни твердой, ни жидкой поверхности. Газы их обширных атмосфер, уплотняясь с приближением к центру, постепенно переходят в жидкое состояние. Именно отсутствие резкого перехода от газообразного состояния вещества в атмосфере к твердому или жидкому позволяет говорить о планетах гигантах, как о планетах без поверхности. Эти планеты быстро совершают один оборот вокруг своей оси (10-18 часов). При этом, они вращаются слоями: слой планеты, расположенный вблизи экватора, вращается значительно быстрее, а околосеверные области являются самыми нетрогливыми. Планеты-гиганты – нетвердые планеты, этим обстоятельством и вызвано их необычное вращение. По той же причине гиганты сжаты у полюсов, что можно заметить в простой телескоп. В центр гигантов есть небольшое твердое ядро, но оно относительно не велико. Как было сказано, атмосфера каждого гиганта плавно переходит в жидкость, а та постепенно тоже уплотняется к центру планеты. Вероятнее всего, в недрах планет гигантов, где высоки давления и температура, есть слой водорода, обладающий металлическими свойствами. Это необычное вещество не является в полной мере ни газообразным, ни твердым. Но оно обладает важным свойством: проводит ток. Благодаря этому, планеты-гиганты обладают магнитным полем. Планеты-гиганты, имея в центре планет твердые раскаленные миллионной величины градусов температуры, являются положительно заряженными ядрами, что соответствует напряженности поля  $S'$ , и вокруг ядер, опережая во вращении сами ядра, планеты вращаются слоями, слои которых с металлическим свойством водорода и в данный момент вращения выполняют роль проводника, находящегося в движении между полем  $N''$  космоса и полем

$S'$  ядра, и образуют этим модель динамо-механизма. При таком движении проводника, металлизированного слоя планеты, между полями  $N''$  и  $S'$  при применении правила Ленца узнаем, что в соответствии правила "направление индуцированной ЭДС всегда таково, что вызванный ею ток и его магнитное поле имеют такое направление, что стремятся препятствовать причине, порождающей эту индуцированную ЭДС". Поскольку слой планеты, выполняющий роль проводника, вращается против часовой стрелки, то индуцированный ток имеет направление движения по часовой стрелке и согласно правила правой руки, где "правая рука мысленно располагается в магнитном поле вдоль проводника (в нашем случае вдоль оси вращения планеты), так, чтобы магнитные линии, выходящие из северного полюса  $N''$ , входили в ладонь, а большой отогнутый палец совпадал с направлением движения проводника, (и в данном случае совпадал с направлением вращения слоя планеты-гиганта), то четыре вытянутых пальца покажут направление действия индуцированной ЭДС", двигающейся вдоль оси вращения планеты от магнитного поля  $S$ , совпадающего с географическим северным полем планеты, и направляющегося вниз к полюсу  $N$ , совпадающего с географическим южным полем, что соответствует данным, полученными научными исследованиями магнетизма планет, к примеру, планет Юпитера и Сатурна.

### ВЫВОД

Структурное строение магнитного поля ядра планеты и поля Галактики, как земной группы планет, так и планет-гигантов – есть принцип действия динамомеханизма, который создает автономное, для каждой планеты в отдельности, условие вырабатывать индуцированную ЭДС, что есть основа возникновения магнитного поля планеты, а также и магнитного поля Солнца.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбрук В.Л. и Шкловский И.С. Крупномасштабное магнитное поле Галактики.
2. Кузнецов М.И. Основы электротехники. М.: Изд. "Высшая школа", 1964.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ginzbruk V.L. i Shklovskij I.S. Krupnomasshtabnoe magnitnoe pole Galaktiki. 2. Kuznecov M.I. Osnovy `elektrotehniki. M.: Izd. "Vysshaya shkola", 1964.

Поступила 25.11.2012

Савич Эдуард Владимирович  
Пенсионер, до 1994 г. – заведующий отделом  
ЦЭБОТнефтегаз НИПИАСУтрансгаз  
61004, Харьков, ул. Маршала Конева, 16  
тел. (057) 629275

Savich E.V.

**Process of planets' magnetic fields formation.**

Heated melt of the cores of the Sun and the planets is the basis of their permanent magnetic fields that, in interaction with the large-scale magnetic field of the Galaxy, condition on the action of their dynamo mechanisms which, on the basis of the speed of the Sun and the planets axial rotation in the galactic magnetic space, provide formation of variable magnetic fields of the Solar System planets.

**Key words – the Galaxy, the Solar System, magnetic fields formation.**

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА БИСТАБИЛЬНЫХ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АКТУАТОРОВ НА ВРЕМЯ ИХ ТРОГАНИЯ

*У статті розглянуто вплив відносної магнітної проникності та провідності матеріалу магнітопроводу на час рушання бістабільного двохпозиційного актуатора вакуумного вимикача.*

*В статье рассматривается влияние относительной магнитной проницаемости и проводимости материала магнитопровода на время трогания бистабильного двухпозиционного актуатора вакуумного выключателя.*

В процессе производства опытных образцов актуаторов вакуумных выключателей средних напряжений [1, 2] (рис. 1) приходится сталкиваться с проблемой отсутствие требуемой марки стали для изготовления магнитопровода и неодинаковость параметров постоянных магнитов. В этой связи возникает вопрос: "Насколько влияют значения магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления материала на параметры трогания актуатора, какими магнитами можно заменить требуемые"? Ответить на этот вопрос можно путем расчета динамики трогания системы, описанной в [3], при подключении обеих катушек актуатора к источнику постоянного напряжения.

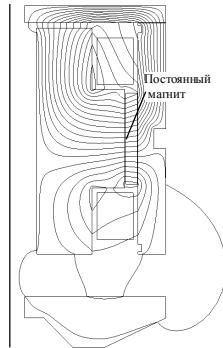


Рис. 1. Поле актуатора в начальном положении якоря

Целью данной статьи является определение степени влияния характеристик материала магнитопровода и постоянных магнитов на параметры трогания поляризованного бистабильного актуатора.

Для проведения таких расчетов в качестве "хорошего" материала принимался материал с максимальной относительной магнитной проницаемостью равной 6000 единиц. Для "плохого" материала максимальная относительная магнитная проницаемость принималась равнялась 2000 единицам. Удельное электрическое сопротивление изменялось от  $20 \cdot 10^{-8}$  до  $2500 \cdot 10^{-8}$ . Последнее значение сопротивления определялось исходя из предположения о том, что магнитопровод выполнен шихтованным. В этом случае вычисление значения эквивалентного сопротивления вихревым токам может быть определено на основании усредненных потерь удельных потерь при переменном магнитном потоке.

Допущения, принимаемые при расчете:

– кривая относительной магнитной проницаемости материала аппроксимировалась экспоненциальной

функцией при помощи метода наименьших квадратов для Ст.10;

– при аппроксимации максимальная магнитная проницаемость совпадала с начальной, т.е. не учитывался характер кривой намагничивания на начальных участках;

– удельное сопротивление стали, эквивалентное шихтованному магнитопроводу, определялось исходя из удельных потерь при синусоидальном характере потока и усредненном значении магнитной индукции по сечению магнитопровода;

– потери на гистерезис не учитывались.

На рис. 2 приведен вид относительной магнитной проницаемости, аппроксимированный экспоненциальной функцией, подобранный на основе метода наименьших квадратов.

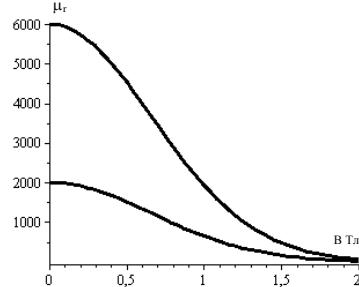


Рис. 2. Кривые относительной магнитной проницаемости

Варианты расчета показаны в табл. 1.

Таблица 1

Сочетание расчетных вариантов

$\mu_{\min}-\sigma_{\min}$	$\mu_{\min}-\sigma_{\max}$
$\mu_{\max}-\sigma_{\min}$	$\mu_{\max}-\sigma_{\max}$

На рис. 3 показаны значения электромагнитной силы в зависимости от времени на начальном этапе движения актуатора при подключения его катушек к источнику постоянного напряжения 220 В с постоянными магнитами NdFeB.

На основании рис. 3 можно заключить: уменьшение максимальной магнитной проницаемости в три раза снижает начальную электромагнитную силу на 313 Н (на 14 %); изменение времени трогания (ноль электромагнитной силы) изменяется при этом с 8,4 мс до 8,85 мс, т.е. незначительно; увеличение проводимости в 125 раз (сплошной магнитопровод) увеличивает время трогания с 8,85 мс до 14,85 мс, т.е. в 1,6 раза.

На рис. 4 показаны суммарные значения тока ка-

© Е.И. Байда

тушек в зависимости от значения проводимости (значение магнитной проницаемости практически не влияет на ток катушек).

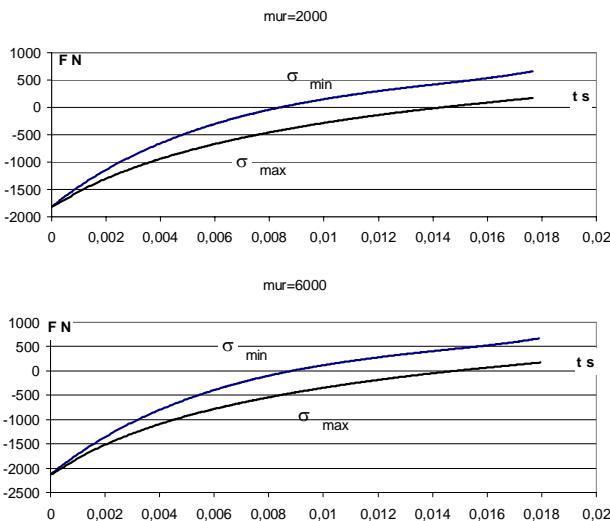


Рис. 3. Значения электромагнитной силы для принятых вариантов расчета

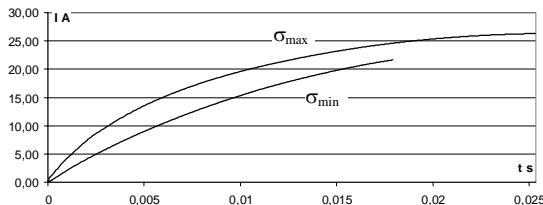


Рис. 4. Значения токов катушек в зависимости от проводимости магнитопровода

Из рис. 4 следует, что значения проводимости существенно влияют на скорость нарастания тока и его значения, которые могут значительно отличаться в начальные моменты времени. Изменение скорости нарастания магнитного потока в зависимости от величины проводимости показаны на рис. 5.

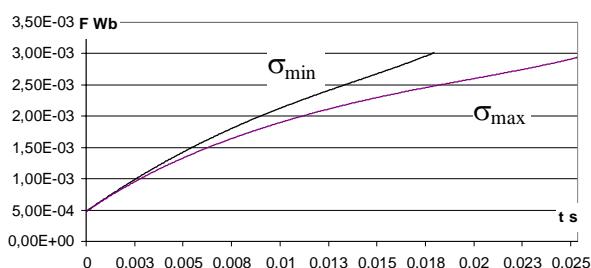


Рис. 5. Скорость нарастания магнитного потока в функции проводимости материала магнитопровода при относительной начальной магнитной проницаемости равной 6000 единиц

Очевидно, что более быстрое нарастание магнитного потока обеспечивает меньшее время трогания аккумулятора.

Определенный интерес представляют значения мощности потерь в магнитопроводе в процессе трогания бистабильного поляризованного аккумулятора.

Потери в магнитопроводе определяются как:

$$P = \int_V \vec{E} \cdot \vec{j} \cdot dV , \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля в магнитопроводе;  $\vec{j}$  – плотность вихревых токов в магнитопроводе;  $V$  – объем магнитопровода.

Известно, что напряженность электрического поля может быть определена:

$$\vec{E} = -\frac{\partial A_\phi(r, z, t)}{\partial t} \cdot \vec{e}_\phi, j_\phi = -\sigma \cdot \frac{\partial A_\phi(r, z, t)}{\partial t} \cdot \vec{e}_\phi , \quad (2)$$

где  $A_\phi(r, z, t)$  – векторный магнитный потенциал, полученный в результате расчета нестационарного электромагнитного поля;  $\sigma$  – проводимость материала магнитопровода.

Тогда

$$P = \int_V \sigma \cdot \left( \frac{\partial A_\phi(r, z, t)}{\partial t} \right)^2 \cdot dV . \quad (3)$$

Результаты расчета приведены на рис. 6.

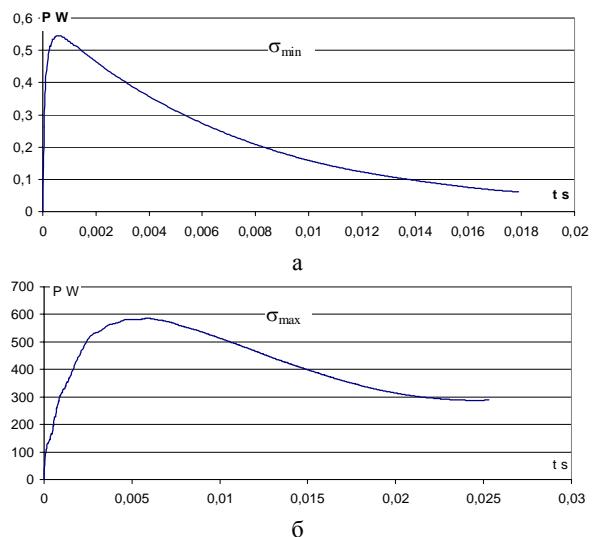


Рис. 6. Мгновенные потери в магнитопроводе:  
а – минимальная проводимость;  
б – максимальная проводимость

Несмотря на значительную разницу в мгновенных значениях, общие потери энергии в сплошном магнитопроводе за время включения невелики и составляют примерно 11 Дж.

Как следует из проведенных расчетов, несмотря на значительные относительные отличия расчетных вариантов по времени трогания, их абсолютные значения невелики – порядка одного полупериода переменного тока. Это можно объяснить спецификой конструкции магнита с двумя относительно большими воздушными зазорами, которые уменьшают эквивалентную индуктивность системы. Помимо этого, в начальном и конечном положениях якоря магнитная система находится в состоянии насыщения (рис. 7), что так же уменьшает эквивалентную индуктивность системы.

В процессе трогания аккумулятора наблюдается крайне неравномерное распределение магнитной индукции по сечению магнитопровода (поток сосредоточен по внутреннему периметру магнита) (рис. 8).

Как показывают расчеты, наибольшее значение на характеристики магнита, как статические, так и динамические, оказывает выбор постоянного магнита. Исследование проводилось для трех видов магнитов: керамический магнит с нелинейной характеристикой –  $H_c = 191262$  A/m; магнит SmCo ( $H_c = 693000$  A/m); магнит на основе NdFeB –  $H_c = 883300$  A/m. На рис. 9 показана зависимость силы в конечном (а) и начальном (б) положениях якоря от значения  $H_c$ .

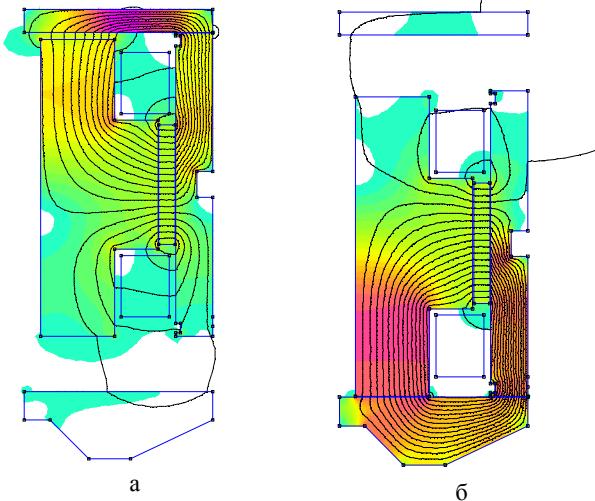


Рис. 7. Значения магнитной индукции в начальном (а) и конечном (б) положениях якоря

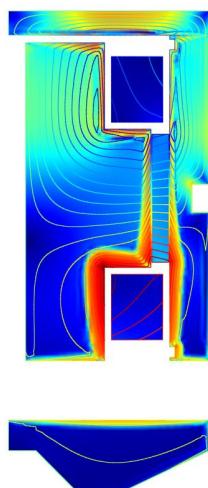


Рис. 8. Распределение магнитной индукции в начальный момент времени (5 мс)

**Выводы.** Основное влияние на время трогания оказывает значение проводимости материала магнитопровода; трехкратное уменьшение магнитной проницаемости снижает начальную силу всего на 14%; шихтовка магнитопровода снижает ток катушек всего на 20% в переходном режиме, требуя при этом изменения конструкции актуатора и удорожания производства; несмотря на значительную величину мгновенных потерь в сплошном магнитопроводе, общие потери энергии невелики; быстродействие магнита обеспечивается конструкцией актуатора (наличие двух воздушных зазоров и насыщением материала магнитопровода в начальном и конечном положениях якоря); распределение магнитного потока по сечению магнитопровода в переходных

режимах крайне неравномерное; наибольшее влияние на работу актуатора оказывают параметры постоянных магнитов, которые нуждаются во входном контроле.

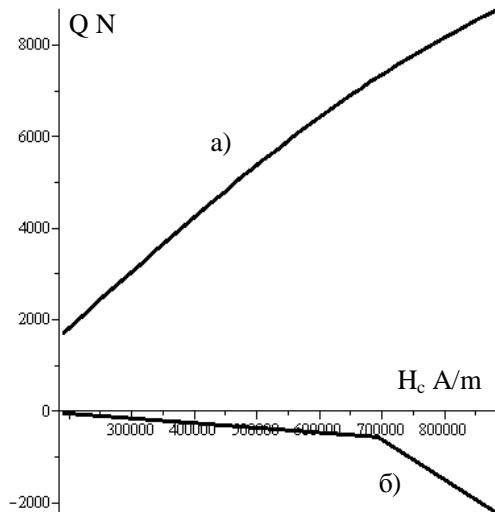


Рис. 9. Значение конечной силы в зависимости от коэрцитивной силы постоянных магнитов

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М. Опытный образец двухпозиционного привода вакуумного выключателя среднего напряжения // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 2. С. 23-27.
2. Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М., Выровец С.В. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 4. – С. 22-26.
3. Байда Е.И. Моделирование динамических характеристик электромагнитных механизмов постоянного тока с магнитной защелкой. // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 2. – С. 3-5.

**Bibliography (transliterated):** 1. Klimenko B.V., Bugajchuk V.M., Grechko A.M. Opytnyy obrazec dvuhpozicionnogo privoda vakuumnogo vyklyuchatelya srednego napryazheniya // Elektrotekhnika i elektromehanika. - 2005. - № 2. S. 23-27. 2. Klimenko B.V., Bugajchuk V.M., Grechko A.M., Vyrovets S.V. Bystrodejstvuyuschij `elektromagnitnyj privod s vytessneniem magnitnogo polya dlya vakuumnogo vyklyuchatelya srednego napryazheniya // Elektrotekhnika i elektromehanika. - 2006. - № 4. - S. 22-26. 3. Bajda E.I. Modelirovaniye dinamicheskikh harakteristik `elektromagnitnyh mehanizmov postoyannogo toka s magnitnoj zaschelkoj. // Elektrotekhnika i elektromehanika. - 2010. - № 2. - S. 3-5.

Поступила 10.02.2013

Байдя Евгений Иванович, к.т.н., доц.  
кафедра "Электрические аппараты"  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21  
тел. (057) 7076976, e-mail: baida\_kpi@i.ua

Baida E.I.

**Influence of bistable polarized actuator core magnetic permeability and resistivity on breakaway time.**

The paper analyzes influence of specific permeability and resistivity of magnetic core material on breakaway time for a vacuum circuit breaker bistable two-position actuator.

**Key words –** specific permeability, resistivity, breakaway time, bistable two-position actuator.

## ДИАГНОСТИКА КОМБИНИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

*Запропоновано методологію діагностики комбінованих дефектів ротора асинхронного двигуна, при яких одночасно можуть бути ушкоджені стержні, коротко замикаючі кільця та активна сталь ротора. Сформульовано діагностичні ознаки та рекомендації щодо виявлення комбінованих дефектів ротора.*

*Предложена методология диагностики комбинированных дефектов ротора асинхронного двигателя, при которых одновременно могут быть повреждены стержни, коротко замыкающие кольца и активная сталь ротора. Сформулированы диагностические признаки и рекомендации по выявлению комбинированных дефектов ротора.*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы объемы работ, выполняемых эксплуатирующими и ремонтными организациями по контролю технического состояния асинхронных двигателей (АД) и диагностике дефектов их конструкции, существенно возросли. Это связано не только с увеличением количества эксплуатируемых АД, но и с требованиями по продлению сроков их эксплуатации, что ведет к их старению и снижению эксплуатационной надежности. Важным узлом наиболее распространенных короткозамкнутых АД является ротор с короткозамкнутой обмоткой (КЗОР). В процессе эксплуатации АД в его роторе возникают повреждения стержней КЗОР (обрывы, сужения сечения, внутренние трещины неполного разрыва, каверны и др.), сегментов короткозамыкающих колец (СКК) КЗОР, активной стали магнитопровода ротора. При этом повреждения, часто носят комбинированный характер, при котором одновременно повреждаются несколько различных элементов. Достоверная диагностика вида повреждения ротора, и особенно комбинированных повреждений, встречает существенные затруднения ввиду сложного характера диагностических сигналов, фиксируемых измерительной системой устройства контроля и диагностики (УКД). В ряде работ [1, 2, 6, 7] предложены УКД, основанные на индукционном методе диагностики. Однако диагностика комбинированных повреждений стержней, колец и стали ротора АД в литературе не описана.

Авторами данной статьи предложено УКД, отличающееся компактностью и достаточной чувствительностью [3, 4]. Эскиз такого УКД представлен на рис. 1, на котором обозначено: 1 – исследуемый ротор; 2 – магнитопровод индуктора УКД; 3 – измерительная обмотка (ИО); 4 – обмотка возбуждения переменным током; 5 – дефект КЗОР (в данном случае показана трещина).

Полюса магнитопровода индуктора УД прикладываются к внешней поверхности ротора АД и подается питание на обмотку возбуждения. Магнитный поток возбуждения замыкается через исследуемый участок ротора и индуцирует в стержнях КЗОР аксиально-направленные токи. При последовательном повороте ротора и появлении дефекта в зоне контроля (между полюсами индуктора) распределение электромагнитного поля в системе "ротор АД – УКД" изменяется, что изменяет величину сигнала ИО.

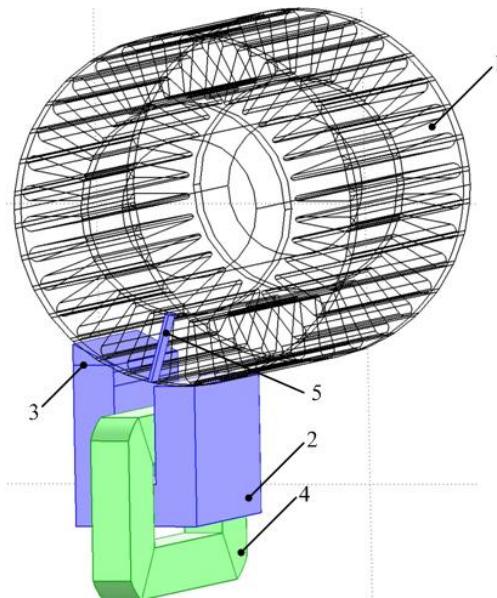


Рис. 1. Эскиз УКД ротора АД

Целью статьи является разработка методологии диагностики комбинированных повреждений короткозамкнутого ротора АД в процессе ремонта двигателя, когда его ротор вынут из статора. Методология базируется на результатах математического моделирования сигналов (ЭДС) ИО УКД. Авторами данной статьи в работе [5] разработана трехмерная полевая математическая модель системы "ротор АД – УКД", позволяющая рассчитать изменение величины сигнала ИО УКД при появлении в роторе АД повреждения. Модель позволяет исследовать различные типы дефектов, а также их комбинации.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель подробно описана в работе [5] и основана на анализе трехмерного электромагнитного поля в системе "ротор АД – УКД" (рис. 1), содержащей поврежденные элементы ротора. Численная реализация модели выполнена методом конечных элементов в пакете COMSOL. Подробнее опишем способы моделирования различных дефектов ротора.

*Дефекты стержней КЗОР.* Трещина в стержне КЗОР моделируется тонким поперечным слоем толщиной 1 мм. При полном разрыве стержня электропроводность слоя принимается равной нулю, что пре-

пятствует замыканию токов через дефектный стержень. При стандартной частоте 50 Гц, они протекают только по половинках разорванного стержня, имея, при этом, разные направления по высоте стержня. При наличии в стержне неполной трещины, глубина которой меньше высоты стержня указанный поперечный слой разделяется по высоте на два участка. Электропроводность одного участка принимается равной нулю (разошедшиеся края трещины), а электропроводность второго принимается равной электропроводности материала стержня (целый участок).

*Дефекты СКК.* Рассматриваются полные разрывы СКК. Разрыв СКК сопровождается изменением распределения токов в КЗОР, и, как следствие, изменением токов в стержнях, которые расположены в зоне контроля УКД. Для анализа изменившихся при разрыве СКК токов КЗОР используется модель системы "ротор АД - УКД", в которой разрыв СКК моделируется тонким радиально ориентированным неэлектропроводным слоем толщиной 1 мм (рис. 2).

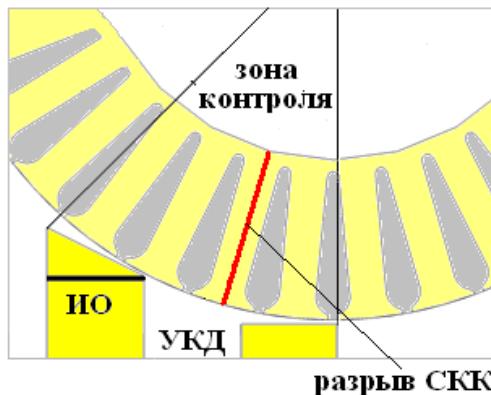


Рис. 2. Моделирование дефектов СКК

Величина сигнала в ИО УКД зависит от положения дефекта СКК относительно зоны контроля УКД. Если линия разрыва СКК расположена симметрично относительно середины зоны контроля, то разрыв СКК практически не влияет на распределение токов КЗОР, поскольку индуцированные токи стержней симметрично растекаются в разные стороны от рассматриваемого сегмента и не текут по нему независимо от того, поврежден сегмент или нет. При повороте ротора и смещении линии разрыва влияние разрыва СКК проявляется в изменении сигнала ИО.

*Дефекты активной стали ротора.* При эксплуатации АД возникают повреждения межлистовой изоляции стали магнитопровода ротора, обусловленные тепловыми и механическими перегрузками, дефектами производства и аварийными ситуациями. Факторами, которые ведут к ускоренному износу магнитопровода ротора, являются: повышенные колебания ротора; повышенный нагрев ротора из-за протекания поперечных токов между стержнями, обусловленных электрическим контактом между стержнями и магнитопроводом. В ряде случаев при повреждении подшипников возникают касания ротора о статор, что ведет к появлению заусенец между листами железа на поверхности ротора. В осевом направлении длина поврежденного участка  $l_{def}$  может быть меньше, чем

полная длина магнитопровода ротора  $l_{rot}$ . При моделировании этого повреждения принимается, что электропроводность поврежденного участка магнитопровода (например, часть длины зубца) равна электропроводности стали магнитопровода ротора.

Среднее время решения одной задачи на ПЭВМ с параметрами: AMD Athlon™ 64 X2 Dual Core 4000+ 2,63 ГГц, 3,00 ГБ ОЗУ, Windows XP Professional SP3, Gygabyte GT440 1Gb, составляет около 730 сек.

### МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИКИ

С помощью математической модели системы "ротор АД - УКД" могут быть рассчитаны сигналы ИО УКД при различных вариантах повреждений ротора: как при одиночных повреждениях, так и при комбинированных повреждениях различных видов. В результате серии расчетов для каждого варианта поврежденного ротора можно построить зависимость сигнала ИО от углового положения ротора (номера стержня КЗОР). Для этого в серии расчетов ротор последовательно поворачивают на  $\frac{1}{2}$  зубцового деления, в результате чего стержни КЗОР последовательно входят в зону контроля УКД. Такую зависимость будем называть *диагностической диаграммой (ДД) ротора*. Очевидно, что ДД исправного ротора имеет неизменную величину (является константой), а при наличии дефекта ДД содержит зоны увеличения и уменьшения сигнала ИО. Для каждого варианта поврежденного ротора в ДД можно установить характерные (диагностические) признаки, позволяющие идентифицировать дефекты. Совокупность ДД, рассчитанных для наиболее характерных видов повреждений ротора и их комбинаций образует *базу знаний*, которая далее используется в процессе диагностики повреждений. Методология диагностики ротора АД состоит из следующих этапов:

- 1) построение базы знаний ДД для выбранной серии роторов АД путем математического моделирования;
- 2) снятие экспериментальной ДД для испытуемого ротора с помощью УКД;
- 3) сравнительный анализ экспериментальной ДД с совокупностью ДД из базы знаний и идентификация вида дефекта.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее приведены некоторые результаты моделирования ДД на примере ротора серийного АД типа 4A112M4Y3 (мощность – 5,5 кВт, число зубцов ротора – 34, диаметр ротора – 125,4 мм, длина ротора – 125 мм, материал КЗОР – алюминий). В качестве диагностического сигнала рассматривается коэффициент чувствительности УКД  $k_e = E_1/E_0$ , где  $E_1, E_0$  – ЭДС ИО, соответственно, при наличии и при отсутствии повреждения ротора.

На рис. 3,а показаны ДД ротора (фрагменты ДД в зоне дефектов) для следующих вариантов повреждений: 1 – при разрыве одного стержня № 5; 2 – при разрыве одного СКК № 5; 3 – при совместном разрыве стержня № 5 и СКК № 5.

Из рис. 3 следует: 1) повреждение стержня вызывает существенно большие изменения сигнала ИО, чем повреждение СКК; 2) при повреждении стержня сигнал ИО имеет максимум, если стержень расположен по середине зоны контроля; 3) при разрыве СКК

и расположении линии разрыва по середине зоны контроля сигнал ИО имеет минимальное значение; 4) при одновременном повреждении стержня и СКК (с одним и тем же номером) форма сигнала на ДД имеет более плавкие фронты. Отмеченные отличия в ДД можно использовать как диагностические признаки, позволяющие идентифицировать вид повреждения.

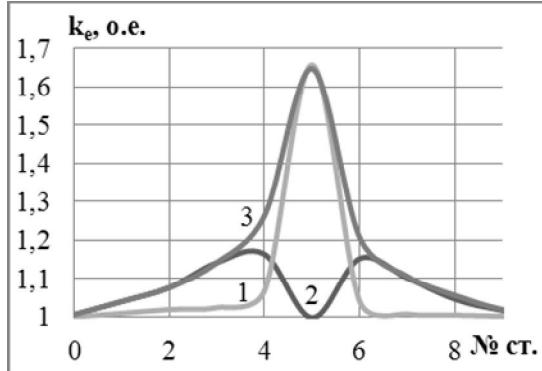


Рис. 3. Фрагмент ДД ротора при повреждении СКК и стержней ротора

На рис. 4 представлены расчетные ДД для следующей совокупности повреждений: 1 – повреждение активной стали участка зубца № 5 ротора длиной 50 мм; 2 – дефект СКК № 11; 3 – полный обрыв стержня ротора № 16; 4 – дефект стали зубца № 24, расположенный рядом с оборванным стержнем № 25.

Из рис. 4 следует, что при дефекте активной стали зубца ротора сигнал ИО снижается на (4...10)% на участке, равном ~ 2 зубцовых деления. Это является характерным диагностическим признаком для идентификации таких повреждений. При наличии рядом расположенных дефектного зубца и разорванного стержня сигнал вначале снижается на (4...10)%, а после поворота ротора на  $\frac{1}{2}$  часть зубцового деления сигнал возрастает, но при этом имеет меньшую амплитуду, чем при одиночном обрыве стержня.

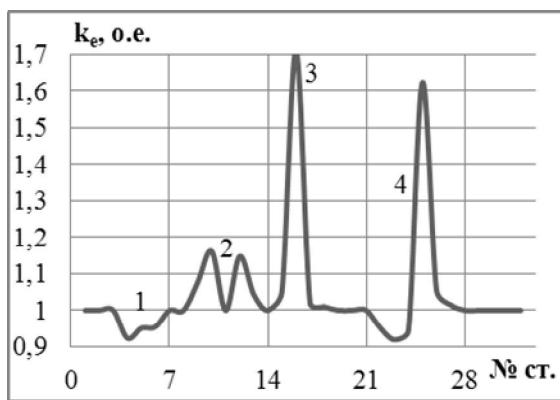


Рис. 4. ДД ротора при повреждении зубца, СКК и стержней ротора

При повреждении стали зубца ротора изменение сигнала ИО зависит от длины поврежденного участка. Путем моделирования установлено, что для надежного выявления повреждений стали зубца ротора (изменение коэффициента чувствительности УКД не менее, чем в 1,05 раза) необходимо, чтобы длина повре-

жденного участка была не менее, чем:

$$l_{\text{деф}} / l_{\text{ром}} \geq 0,38$$

При комбинированном повреждении ротора АД отдельные поврежденные элементы могут располагаться рядом друг с другом или находиться на удалении. Во втором случае взаимное влияние дефектов в ДД проявляется значительно меньше. Поэтому при выявлении удаленных друг от друга дефектов, их можно идентифицировать по диагностическим признакам, характерным для одиночных дефектов, как это продемонстрировано на рис. 4. Для диагностики близко расположенных дефектов необходимо учитывать их взаимное влияние в ДД. На рис. 5 изображен фрагмент ДД для следующих вариантов: 1 – совместный дефект зубца стали №8 и СКК № 8; 2 – дефект только СКК № 8; 3 – совместный дефект зубца ротора № 7, стержня № 8 и СКК № 8.

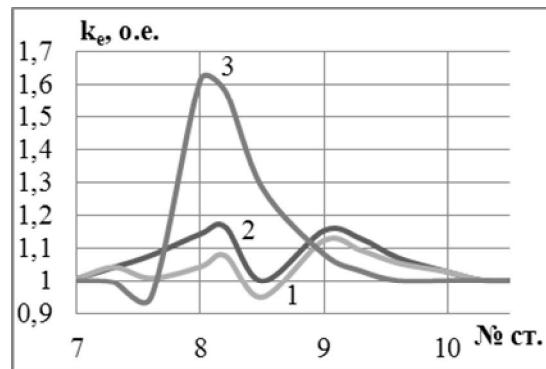


Рис. 5. Фрагмент ДД с близко расположенными дефектами зубца, СКК и стержня ротора

Как видно из рис. 5, при совместном дефекте стали зубца и СКК кривая 1 имеет вид, приближенный к виду кривой 2 при наличии только одного дефекта СКК. Отличие заключается в том, что кривая 1 имеет определенную асимметрию формы в начальной части и несколько меньшую амплитуду сигнала при прохождении дефектного зубца через середину зоны контроля. При разрыве нескольких расположенных рядом стержней  $n_s$  ширина импульса на ДД равна  $t_2 n_s$ , где  $t_2$  – длина зубцового деления ротора.

Результаты проведенных исследований ДД при различных вариантах повреждений ротора обобщены в таблице, представляющей собою диагностическую карту, с помощью которой можно идентифицировать как изолированные, так и комбинированные повреждения элементов ротора. В таблице изображены характерные формы фрагментов ДД в зоне дефектов, а также численные значения коэффициентов. В таблице приведены:  $k_e$  – коэффициент чувствительности УКД,  $k_{\text{min}}$ ,  $k_{\text{max}}$  – минимальное и максимальное значение коэффициента чувствительности,  $t_z$  – выраженная в зубцовых делениях ширина импульса на ДД.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методология диагностики дефектов короткозамкнутого ротора АД. Диагностика основана на сравнительном анализе экспериментальной и расчетной ДД ротора. На основе результатов модели-

рования электромагнитного поля в системе «ротор АД – УКД» разработана диагностическая карта, позволяющая идентифицировать одиночные и комбинированные повреждения ротора АД: разрывы стержней и СКК, дефекты стали зубца ротора.

Дефект	Стержня	СКК	Стали зубца ротора
Стержня	$k_e \geq 1,35; t_z = n_s$ 	$k_e \geq 1,35; 5 > t_z \geq 3$ 	$0,9 \leq k_{emin} \leq 0,97; k_{emax} \geq 1,3; t_z = 2$ 
СКК	$k_e \geq 1,35; 5 > t_z \geq 3$ 	$k_{emin}=1; k_{emax}=1,07 \dots 1,2; t_z \geq 3$ 	$0,9 \leq k_{emin} \leq 0,97; 1,05 \leq k_{emax} \leq 1,17; 5 > t_z \geq 3$ 
Стали зубца ротора	$0,9 \leq k_{emin} \leq 0,97; k_{emax} \geq 1,3; t_z = 2$ 	$0,9 \leq k_{emin} \leq 0,97; 1,05 \leq k_{emax} \leq 1,17; 5 > t_z \geq 3$ 	$0,9 \leq k_e \leq 1; t_z = 2$ 

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авторське свідоцтво СРСР № 1182442 Спосіб контролю якості короткозамкненої обмотки ротора та пристрій для його здійснення МПК G 01 R 31/02, 1985.
- Авторське свідоцтво СРСР №1396093 Пристрій для випробування короткозамкнених роторів асинхронних двигунів МПК G 01 R 31/02, 1988.
- Васьковский Ю.Н., Коваленко М.А. Исследование устройства контроля короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя / Электротехника і електромеханіка. – 2011. – №6. – С. 18-22.
- Васьковский Ю.Н., Коваленко М.А. Исследование и оптимизация устройства диагностики дефектов обмотки ротора короткозамкнутого асинхронного электродвигателя // Электротехника та електроенергетика. – 2012. – №2. – С. 12-18.
- Васьковский Ю.Н., Коваленко М.А. Трехмерная полевая математическая модель устройства диагностики короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей // Праці ІЕД НАНУ. – 2012. – № 31. – С. 78-83.
- А. И. Зайцев, М.П. Табинский. Установка для обнаружения литейных дефектов стержней ротора асинхронного двигателя // Электротехника. – 1966. – №3. – С. 56-58
7. Сивокобыленко В.Ф., Нури Абделбассет. Диагностика состояния короткозамкнутых роторов асинхронных машин // Электричество. – 1997. – № 3. – С. 25-26

**Bibliography (transliterated):** 1. Avtors'ke svidocstvo SRSR № 1182442 Sposob kontrolyu yakosti korotkozamknenoj obmotki rotora ta pristrij dlya joho zdjysnennya MPK G 01 R 31/02, 1985. 2. Avtors'ke svidocstvo SRSR №1396093 Pristrij dlya viprobuvennya korotkozamknenih rotoriv asinhronnih dviguniv MPK G 01 R 31/02, 1988. 3. Vas'kovskij Yu.N., Kovalenko M.A. Issledovanje ustrojstva kontrolya korotkozamknutoj obmotki rotora asinhronnogo dvigatelya / Elektrotehnika i elektromehanika. - 2011. - №6. - S. 18-22.

2. Использование разработанной методологии позволяет не только расширить функциональные возможности индукционных УКД, но и повысить качество проведенных регламентных и ремонтных работ роторов АД.

4. Vas'kovskij Yu.N., Kovalenko M.A. Issledovanje i optimizaciya ustrojstva diagnostiki defektov obmotki rotora korotkozamknutogo asinhronnogo `elektrodvigatelya // Elektrotehnika ta elektroenergetika. - 2012. - №2. - S. 12-18. 5. Vas'kovskij Yu.N., Kovalenko M.A. Trehmernaya polevaya matematicheskaya model` ustrojstva diagnostiki korotkozamknutoj kletki rotora asinhronnykh dvigatelej // Praci IED NANU. - 2012. - № 31. - S. 78-83. 6. A. I. Zajcev, M.P. Tabinskij. Ustanovka dlya obnaruzheniya litejnyh defektov sterzhnej rotora asinhronnogo dvigatelya // `Elektrotehnika. - 1966. - №3. - S. 56-58 7. Sivokobylenko V.F., Nuri Abdelbasset. Diagnostika sostoyaniya korotkozamknutyh rotorov asinhronnyh mashin // `Elektrichestvo. - 1997. - № 3. - S. 25-26

Поступила 13.02.2013

Васьковский Юрий Николаевич, д.т.н., проф.  
Коваленко Михаил Анатольевич  
Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт"  
кафедра электромеханики  
03056, Киев, пр. Победы, 37  
тел. (044) 4549518, e-mail: vun157@voliacable.com

Vas'kovsky Y.N., Kovalenko M.A.

**Diagnostics of induction motor rotor combined defects with an induction method.**

A diagnostics methodology for combined defects of induction motor rotors is introduced, the defects considered being simultaneous damage of rods, cage rings, and the rotor active steel. Diagnostic features and recommendations on the rotor combined defects identification are formulated.

**Key words – short-circuited winding, induction motor rotor defects, three-dimensional field mathematical model, device monitoring and diagnostics.**

## ОПТИМИЗАЦІЯ НАГРУЗОЧНИХ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

*Запропонована чисельна процедура вибору оптимальної частоти і величини живлячої синусоїдальної напруги асинхронного двигуна для заданих значень швидкості обертання і моменту навантаження з метою забезпечення мінімальних втрат потужності.*

*Предложена численная процедура выбора оптимальных частоты и величины питающего синусоидального напряжения асинхронного двигателя для заданных значений скорости вращения и момента нагрузки с целью обеспечения минимальных потерь мощности.*

### ВВЕДЕНИЕ

Энергосбережение – одно из приоритетных направлений технической политики и является наиболее дешевым и безопасным способом увеличения энергогенерирующих мощностей. Так как электроприводы потребляют до 70 % вырабатываемой электроэнергии [1], наиболее существенная экономия электроэнергии может быть достигнута при использовании регулируемых электроприводов. В связи с тем, что среди подобных электроприводов определяющее положение занимают частотно-регулируемые асинхронные электроприводы, оптимизация их режимов будет способствовать решению задачи энергосбережения. Несмотря на достигнутые успехи в области управления асинхронными электроприводами, существует возможность уменьшить их потери мощности в нагружочных режимах.

Вопросам управления и оптимизации асинхронных электроприводов посвящено немало работ (см. обзор в [1]). Например, в [2] приводятся оптимальные идеализированные характеристики асинхронного двигателя (АД), построенные по двум упрощенным уравнениям статорной цепи в диапазоне синхронной скорости до теоретически бесконечной. В [3] указывается на существенное влияние насыщения и вытеснения тока на энергетические показатели АД. Авторы работы [4] видят основной резерв повышения эффективности АД в совершенствовании конструкции зубцовой зоны статора. В [5] изложены результаты экспериментального исследования нагрева АД при различных источниках питания, и подтверждено, что минимальный нагрев достигается при питании от источника синусоидального напряжения. Результаты по коррекции механических характеристик тяговых асинхронных двигателей путем изменения частоты и величины питающего синусоидального напряжения, получаемого от преобразователя частоты и числа фаз, помещены в [6].

Из приведенного краткого обзора следует, что при анализе энергетических показателей существует необходимость применения более полного математического описания режимов АД с учетом нелинейности магнитной цепи и разработке конструктивных рекомендаций по повышению эффективности нагружочных режимов АД.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является оптимизация нагружочных режимов асинхронного двигателя по потерям мощности путем выбора величины и частоты питаю-

щего синусоидального напряжения с использованием математического описания во вращающихся  $dq$  – координатах и с учетом насыщения магнитной цепи.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АД

В соответствии с [7] уравнения статического режима АД с короткозамкнутым ротором в ортогональных  $dq$  – координатах, вращающихся с синхронной скоростью  $\omega_s$  с опережающим вращением поперечной оси, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} -\omega_s \psi_{sq} + r_s i_{sd} &= u_{sd}; \\ \omega_s \psi_{sd} + r_s i_{sq} &= u_{sq}; \\ -(\omega_s - \Omega) \psi_{rq} + r_r i_{rd} &= 0; \\ (\omega_s - \Omega) \psi_{rd} + r_r i_{rq} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $u_{sd}$ ,  $u_{sq}$ ,  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ ,  $\psi_{sd}$ ,  $\psi_{sq}$ ,  $\psi_{rd}$ ,  $\psi_{rq}$  – составляющие напряжения статора, токов и потокосцеплений статора и ротора по продольной и поперечной осям;  $r_s$ ,  $r_r$  – сопротивления фазы статора и ротора;  $\Omega$  – угловая скорость вращения ротора.

Вводя индуктивности рассеяния статора и ротора  $L_{\sigma s}$ ,  $L_{\sigma r}$  и потокосцепления в зазоре  $\psi_{\delta d}$ ,  $\psi_{\delta q}$ , получаем для составляющих потокосцеплений

$$\psi_{sd} = L_{\sigma s} i_{sd} + \psi_{\delta d}; \quad \psi_{sq} = L_{\sigma s} i_{sq} + \psi_{\delta q};$$

$$\psi_{rd} = L_{\sigma r} i_{rd} + \psi_{\delta d}; \quad \psi_{rq} = L_{\sigma r} i_{rq} + \psi_{\delta q}.$$

Насыщение магнитной цепи учтем нелинейной зависимостью потокосцеплений в зазоре от продольного и поперечного тока

$$\psi_{\delta d} = a \cdot \arctg(b i_{\delta d}) + c i_{\delta d}, \quad \psi_{\delta q} = a \cdot \arctg(b i_{\delta q}) + c i_{\delta q},$$

$$\psi_{\delta} = \sqrt{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2},$$

где  $i_{\delta d} = i_{sd} + i_{rd}$ ;  $i_{\delta q} = i_{sq} + i_{rq}$  – продольный и поперечный намагничивающий токи.

Момент АД определяется формулой

$$M = 1,5\sqrt{3} \cdot (i_{sq} \psi_{\delta d} - i_{sd} \psi_{\delta q}),$$

а токи статора и ротора – выражениями

$$i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2}; \quad i_r = \sqrt{i_{rd}^2 + i_{rq}^2}.$$

Теперь уравнения статического режима (1) принимают вид (далее полагаем  $U_{sd} = 0$ ;  $U_{sq} = -U$ )

$$\left. \begin{aligned} -\omega_s \cdot (L_{\sigma s} i_{sq} + \psi_{\delta q} (i_{sq} + i_{rq})) + r_s i_{sd} &= u_{sd}; \\ \omega_s \cdot (L_{\sigma s} i_{sd} + \psi_{\delta d} (i_{sd} + i_{rd})) + r_s i_{sq} &= u_{sq}, \\ -(\omega_s - \Omega) \cdot (L_{\sigma r} i_{rq} + \psi_{\delta q} (i_{sq} + i_{rq})) + r_r i_{rd} &= 0; \\ (\omega_s - \Omega) \cdot (L_{\sigma r} i_{rd} + \psi_{\delta d} (i_{sd} + i_{rd})) + r_r i_{rq} &= 0; \\ M &= 1,5\sqrt{3} \cdot (\psi_{\delta d} \cdot i_{sq} - \psi_{\delta q} \cdot i_{sd}) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

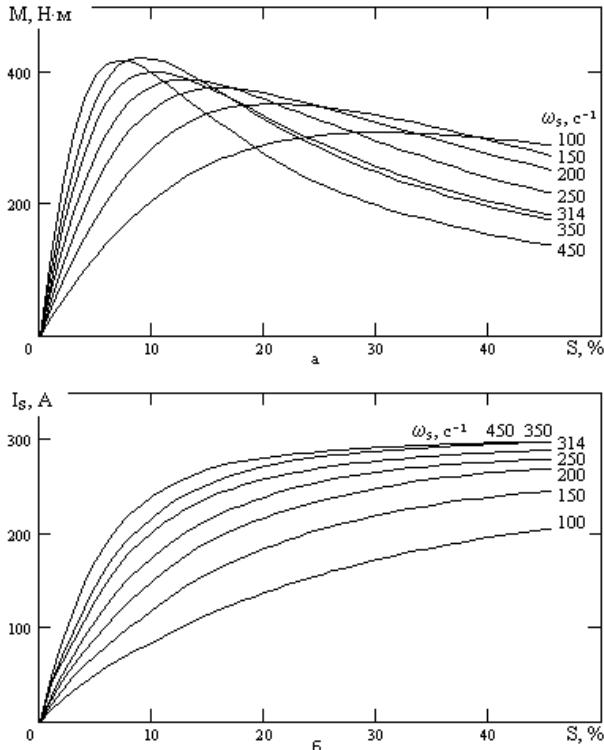


Рис. 1. Характеристики АД: а) механические; б) ток статора

При заданных величинах входного напряжения  $U$  и его частоты  $\omega_s$ , придавая скорости вращения ротора различные значения, решением первых четырех уравнений (2) определяем токи статора и ротора, а по последнему – момент АД, т.е. получаем механические характеристики. На рис. 1,а приведены графики этих характеристик, а на рис. 1,б – зависимости тока статора от скольжения. Графики тока ротора имеют вид, аналогичный рис.1,б. Расчеты выполнены для двигателя мощностью 55 кВт с номинальным напряжением 380 В, линейным током 102 А, скоростью вращения 2940 об/мин и параметрами:  $L_{\sigma s} = 2,49$  мГн;  $L_{\sigma r} = 1,5$  мГн;  $r_s = 0,163$  Ом;  $r_r = 0,126$  Ом. Коэффициенты аппроксимации потокосцепления:  $a = 0,95$ ;  $b = 0,08$ ;  $c = 0,003$ . Напряжение и его частота изменились в соответствии с отношением

$$\frac{U}{\omega_s} = \frac{U_{nom}}{\omega_{s nom}} = \frac{380}{314} = 1,21.$$

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Потери мощности двигателя пропорциональны величине

$$P = r_s i_s^2 + r_r i_r^2 + k_m \psi_\delta^2 \omega_s + k_{bm} \psi_\delta^2 \omega_s^2, \quad (3)$$

где  $k_m$  и  $k_{bm}$  – коэффициенты, определяющие потери в

стали на перемагничивание и вихревые токи. Поставим задачу выбора таких  $\omega_s$  и  $U$ , чтобы в заданном нагрузочном режиме  $M$  и  $\Omega$  обеспечить минимальное значение потерь мощности  $P$  (3). Так как при заданных  $M$  и  $\Omega$  составляющие токов определяются из первого, третьего, четвертого и пятого уравнений (2) при выбранной  $\omega_s$ , а напряжение  $U$  затем определяется из второго уравнения в (2), то  $P$  является однозначной функцией  $\omega_s$ . Поэтому для обеспечения минимума (3) должно выполняться условие

$$\frac{dP}{d\omega_s} = 0, \quad (4)$$

в которое входят составляющие токов  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $i_{rd}$ ,  $i_r$  и их производные по  $\omega_s$ . Для определения этих производных выполним дифференцирование первого, третьего, четвертого и пятого уравнений в (2) по  $\omega_s$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d}{d\omega_s} (\omega_s \cdot (L_{\sigma s} i_{sq} + \psi_{\delta q})) + r_s \cdot \frac{di_{sd}}{d\omega_s} &= 0; \\ -\frac{d}{d\omega_s} ((\omega_s - \Omega) \cdot (L_{\sigma r} i_{rq} + \psi_{\delta q})) + r_r \cdot \frac{di_{rd}}{d\omega_s} &= 0; \\ \frac{d}{d\omega_s} ((\omega_s - \Omega) \cdot (L_{\sigma r} i_{rd} + \psi_{\delta d})) + r_r \cdot \frac{di_{rq}}{d\omega_s} &= 0; \\ \frac{d}{d\omega_s} (\psi_{\delta d} \cdot i_{sq} - \psi_{\delta q} \cdot i_{sd}) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{\delta d}}{d\omega_s} &= \left( \frac{a \cdot b}{1 + (b \cdot (i_{sd} + i_{rd}))^2} + c \right) \cdot \left( \frac{di_{sd}}{d\omega_s} + \frac{di_{rd}}{d\omega_s} \right); \\ \frac{d\psi_{\delta q}}{d\omega_s} &= \left( \frac{a \cdot b}{1 + (b \cdot (i_{sq} + i_{rq}))^2} + c \right) \cdot \left( \frac{di_{sq}}{d\omega_s} + \frac{di_{rq}}{d\omega_s} \right). \end{aligned}$$

Оптимальное значение  $\omega_{os}$  находится численно последовательным совместным решением систем уравнений (2), (5) и (4) для заданного сочетания величин  $M$  и  $\Omega$ . После определения  $\omega_{os}$  рассчитывается соответствующее оптимальное значение  $U_o$  из второго уравнения (2). Далее из первых четырех уравнений (2) определяются токи и потокосцепления, соответствующие оптимальным  $\omega_{os}$ ,  $U_o$ , а также коэффициент мощности  $\cos\varphi$  и КПД  $\eta$ .

Расчет для различных возможных сочетаний  $M$  и  $\Omega$  при  $k_m = 0,1$ ,  $k_{bm} = 10^3$  и приведенных выше численных параметрах двигателя показал, что оптимальное скольжение возрастает с ростом  $M$  и уменьшается с ростом  $\Omega$ . Соответствующее оптимальное напряжение увеличивается с ростом  $M$  и  $\Omega$ . Оптимальные значения токов статора и ротора при заданном  $M$  не зависят от  $\Omega$  и возрастают при увеличении  $M$ .

На рис. 2,а изображены графики зависимостей оптимального напряжения от  $\Omega$  для нескольких значений  $M$ , а на рис. 2,б – соответствующие графики оптимального скольжения. На рис. 2,в показаны графики оптимальных значений токов статора и ротора. Из рис. 2 следует, что номинальный режим при  $\Omega_{nom}=307,9$  c<sup>-1</sup>;  $M_{nom}=157$  Н·м;  $\omega_s=314$  c<sup>-1</sup>;  $i_{os}=60,9$  А;  $i_{or}=53,5$  А близок к оптимальному.

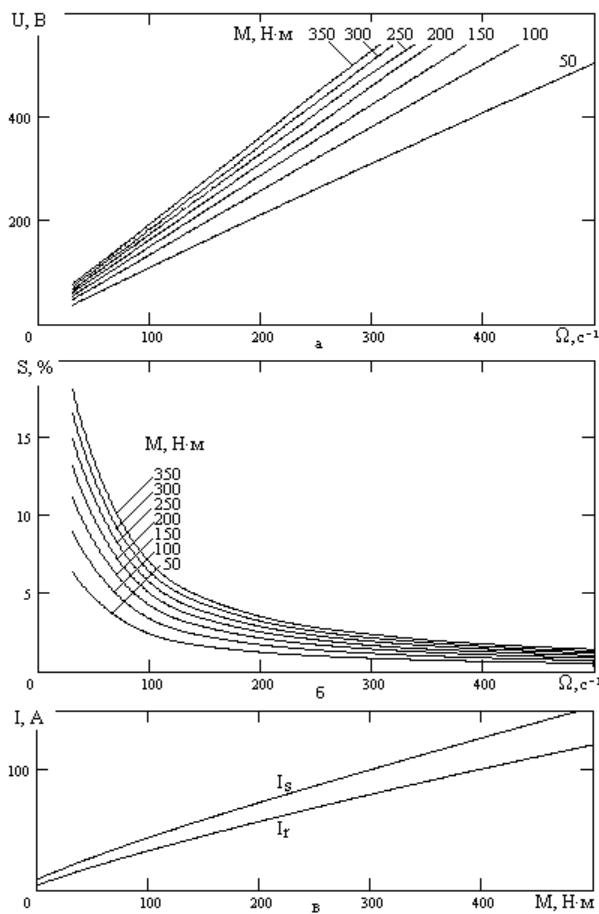


Рис. 2. Оптимальные характеристики АД:  
а) напряжение; б) скольжение; в) токи

Рассмотрим режим, который возникает при набросе момента нагрузки до 250 Н·м и желании сохранить номинальную скорость  $\Omega_{nom}$ . На рис. 3,а изображены возможные реализации этого режима при различных  $\omega_s$ . Для наглядности график потерь мощности  $P$  показан уменьшенным в 10 раз, он имеет выраженный минимум при  $\omega_{os}=313,8 \text{ с}^{-1}$  и при оптимальном напряжении  $U_o=488 \text{ В}$ . Оптимальное значение тока статора 86 А, ротора – 65 А. На рис. 3,б приведены также графики сопротивления, КПД  $\eta$ , скольжения и потокосцепления от  $\omega_s$ , на которых отчетливо выделяется оптимальный режим. На рис. 3,в изображены графики зависимостей составляющих потерь мощности от частоты по (3). Графики потерь в стали  $P_n$  и  $P_{st}$  показаны увеличенными в 10 раз. Из рис. 3,в следует, что определяющую роль в формировании потерь мощности играют потери  $P_s$  в статорной обмотке, которые увеличиваются с уменьшением частоты. Для сравнения: после увеличения нагрузки до 250 Н·м без оптимального регулирования получаем следующие параметры режима:  $\Omega=303,2 \text{ с}^{-1}$ ;  $i_s=96,1 \text{ А}$ ;  $i_r=89,8 \text{ А}$ . Таким образом, оптимальное регулирование напряжения и частоты позволяет снизить токи двигателя и потери в нагрузочных режимах. Выбор режима  $\Omega=307,9 \text{ с}^{-1}$ ;  $M=250 \text{ Н}\cdot\text{м}$  по механическим характеристикам также дает токи  $i_s=96,2 \text{ А}$ ;  $i_r=89,9 \text{ А}$  при частоте  $\omega_s=318,6 \text{ с}^{-1}$  и напряжении 385,6 В.

На рис. 4 изображен динамический процесс наброса нагрузки 250 Н·м в момент 0,1 с и регулиро-

вания напряжения до оптимальной величины 488 В в момент 0,5 с. Графики построены по результатам численного решения дифференциальных уравнений, соответствующих статическим уравнениям (2):

$$\frac{di_{sd}}{dt} = D^{-1} \cdot ((L_{\sigma r} + d) \cdot f_1 - d \cdot f_2);$$

$$\frac{di_{rd}}{dt} = D^{-1} \cdot ((L_{\sigma s} + d) \cdot f_2 - d \cdot f_1);$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = Q^{-1} \cdot ((L_{\sigma r} + q) \cdot f_3 - q \cdot f_4)$$

$$\frac{di_{rq}}{dt} = Q^{-1} \cdot ((L_{\sigma s} + q) \cdot f_4 - q \cdot f_3)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = J^{-1} \cdot (M - M_{nacp}),$$

где

$$f_1 = \omega_s \psi_{sq} - r_s i_{sd}; \quad f_2 = (\omega_s - \Omega) \psi_{rq} - r_r i_{rd};$$

$$f_3 = U - \omega_s \psi_{sd} - r_s i_{sq}; \quad f_4 = -(\omega_s - \Omega) \psi_{rd} - r_r i_{rq};$$

$$d = \frac{a \cdot b}{1 + b^2 (i_{sd} + i_{rd})^2} + c; \quad q = \frac{a \cdot b}{1 + b^2 (i_{sd} + i_{rd})^2} + c;$$

$$D = L_{\sigma s} L_{\sigma r} + (L_{\sigma s} + L_{\sigma r}) d; \quad Q = L_{\sigma s} L_{\sigma r} + (L_{\sigma s} + L_{\sigma r}) q;$$

$J$  – момент инерции.

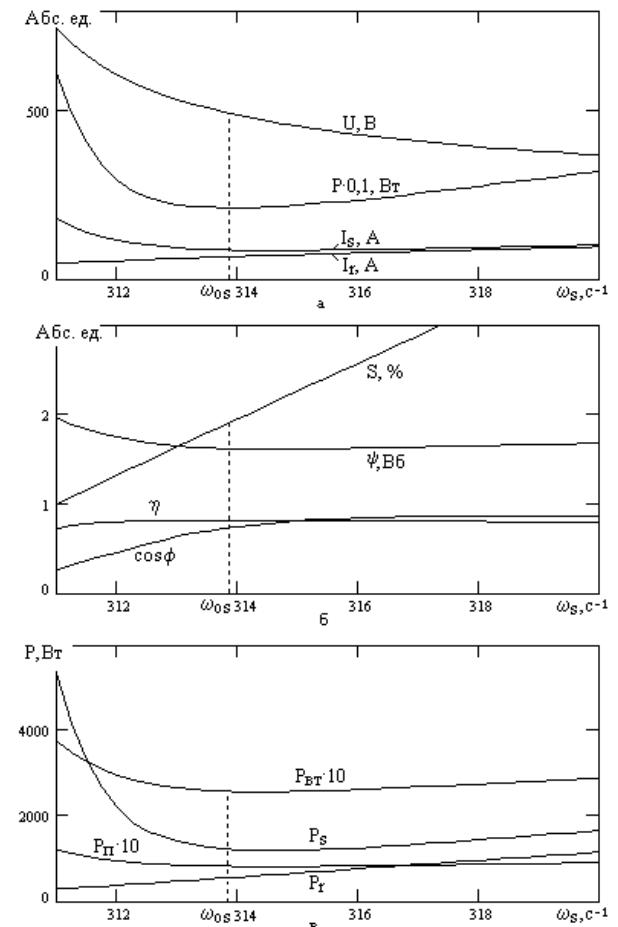


Рис. 3. Оптимизация нагрузочного режима:

а) напряжение, потери мощности, токи;

б) скольжение, потокосцепление, КПД,

коэффициент мощности;

в) составляющие потерь мощности

Рис. 4 показывает, что после регулирования скорость вращения восстанавливает значение  $307,9 \text{ с}^{-1}$ , а токи статора и ротора снижаются до оптимальных минимальных величин. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными, полученными в [6] для тяговых АД.

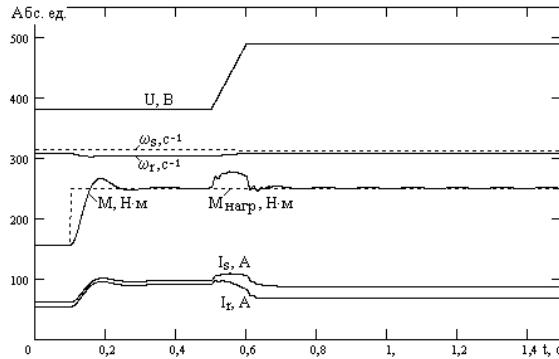


Рис. 4. Оптимизация динамического процесса набора нагрузки

## ВЫВОДЫ

Предложенная численная процедура позволяет выбирать оптимальные значения величины и частоты синусоидального питающего напряжения асинхронного двигателя для заданных скорости вращения и момента нагрузки при обеспечении минимальных потерь мощности. Оптимальное регулирование эффективно при превышении моментом нагрузки номинального значения. Перспективным является аппаратная реализация системы оптимального регулирования напряжения и частоты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Braslavskij, Z.Sh. Ishmatov. – М.: изд. центр "Академия", 2004. – 256 с.
- Шийка А.А. Энергетические и регулировочные характеристики асинхронного электропривода с оптимальным векторным управлением / А.А. Шийка, Е.М. Потапенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 1. – С. 45-50.
- Петрушин В.С. Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на энергетические показатели регулируемых АД / В.С. Петрушин, А.М. Якимец, Б.В. Каленик // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 1. – С. 38-40.
- Кононенко К.Е. Основной резерв повышения энергоэффективности асинхронных двигателей с КЗ ротором / К.Е. Кононенко, А.В. Кононенко, С.В. Крутских // Известия ВУЗов. Сер. Электромеханика.– 2012. – № 1. – С. 54-60.
- Петренко А.М. Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания / А.М. Петренко // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 21-23.

- Конашинский А.Ю. Оценка эффективности видов электрической коррекции электромеханических характеристик асинхронных тяговых двигателей / А.Ю. Конашинский // Известия ВУЗов. Сер. Электромеханика.– 2000. – № 3. – С. 30-34.
- Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: изд. центр "Академия", 2006. – 272 с.

- Bibliography (transliterated):**
- Braslavskij I.Ya. 'Energosberegayuschiy asinhronnij elektroprivod / I.Ya.Braslavskij, Z.Sh.Ishmatov. – M.: izd. centr "Akademiya", 2004. – 256 s.
  - Shijka A.A. 'Energeticheskie i regulirovochnye harakteristiki asinhronnogo elektroprivoda s optimal'nym vektornym upravleniem / A.A.Shijka, E.M.Potapenko // Elektrotehnika ta elektroenergetika. – 2012. – № 1. – S. 45-50.
  - Petrushin V.S. Vliyanie nasysheniya stali magnitoprovoda i vytessneniya toka v obmotke rotora na energeticheskie pokazateli reguliruemyh AD / V.S.Petrushin, A.M.Yakimec, B.V.Kalenik // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2008. – № 1. – S. 38-40.
  - Kononenko K.E. Osnovnoj rezerv povysheniya energoeffektivnosti asinhronnnyh dvigatelej s KZ rotorom / K.E.Kononenko, A.V.Kononenko, S.V.Krutskikh // Izvestiya VUZov. Ser. 'Elektromehanika. – 2012. – № 1. – S.54-60.
  - Petrenko A.M. 'Eksperimental'noe issledovanie nagreva chastotno-upravlyayemogo asinhronnogo dvigatelya pri razlichnyh istochnikah pitaniya / A.M.Petrenko // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2010. – № 5. – S. 21-23.
  - Konashinskij A.Yu. Ocena effektivnosti vidov elektricheskoy korrekciy elektromehanicheskikh harakteristik asinhronnnyh tyagovyh dvigatelej / A.Yu.Konashinskij // Izvestiya VUZov. Ser. 'Elektromehanika. – 2000. – № 3. – S.30-34.
  - Sokolovskij G.G. 'Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem / G.G.Sokolovskij. – M.: izd. centr "Akademiya", 2006. – 272 s.

Поступила 01.02.2013

Канов Лев Николаевич, к.т.н., доц.

Севастопольский национальный технический университет кафедра судовых и промышленных электромеханических систем

99053, Севастополь, ул. Университетская, 33  
тел. (0692) 435-272

Kanov L.N.

**Optimization of loading modes of a controlled asynchronous electric drive.**

The paper introduces a numerical procedure of an asynchronous motor optimum frequency and feed sine-wave voltage selection for given values of the motor speed and load moment to provide minimum power loss.

**Key words – asynchronous motor, stationary loading mode, mathematical description, optimum voltage, optimum frequency, power loss.**

## MULTIPHYSICAL NUMERICAL ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC DEVICES: STATE-OF-THE-ART AND GENERALIZATION

У статті наведено аналіз стану проблеми та здійснено спробу узагальнення основних принципів комп'ютерного моделювання зв'язаних процесів у різноманітних електромагнітних пристроях (електричні машини, індукційні нагрівачі, актуатори, електрофізичне обладнання та ін.). Наведений аналіз побудовано на досвіді автора з розв'язання різноманітних прикладних задач стосовно проектування та експлуатації сучасних електрических машин і апаратів, а також на роботах інших дослідників.

В статье приведен анализ состояния вопроса и предпринята попытка обобщения основных принципов компьютерного моделирования связанных процессов в различных электромагнитных устройствах (электрические машины, индукционные нагреватели, актуаторы, электрофизическое оборудование и др.). Приведенный анализ основан на опыте автора по решению различных прикладных задач применительно к проектированию и эксплуатации современных электрических машин и аппаратов, а также на работах других исследователей.

### I. INTRODUCTION

The design of rotation electrical machines and other electromagnetic devices (induction heaters, various actuators, electrophysical devices, etc.) presents one of the most challenging applied tasks since many different phenomena and their interaction have to be considered. To develop modern, effective and cheap design it is strongly recommended to carry out complex investigations of various physical processes and effects in the device under consideration taking into account their complicated interaction. Such research works can be done by means of relatively cheap computer simulation (in other words: "coupled" [1-3] or "multiphysical" [4] numerical analysis) instead of expensive full-scale experiments.

The operation principle of electrical machines and other electrical devices is based on electrical and magnetic fields, heating and the forces resulting from those fields. In the process of designing an electrical machine or another electrical device, one has to deal with electromagnetics, temperature distributions, structural mechanics, thermodynamics, fluid dynamics and their often complex interaction. Therefore, a reliable numerical simulation of electrical machines, devices and apparatuses – enable to tackle all aspects of the multiphysical approach as well as fabrication, design and material tolerances – is desirable and even mandatory in the frame of the design procedure and operation of the equipment.

Coupled field modelling [1-3] (in other words: "multiphysical" [4], "multi-field" [5], "multi equations" [6] or even "multi-nature" [7] simulation) of various electrical machines and other electrical devices is one of most complicated and, simultaneously, quickly developing areas of modern computational electromagnetics. In the author's opinion, multiphysical numerical analysis of electrical machines and other devices should be based on results of intensive pure research aimed to make a valuable contribution in the development of modern fundamental (theoretical) principles and basics of applied investigations in the field. Here, necessity to design, manufacture, operate, and, therefore, simulate new types of innovative electrical devices working on the base of new physical principles requires to generalize basic principles of the coupled (multiphysical) numerical analysis of electrical machines and other electromagnetic devices. The author proposes and elaborates in this paper two "directions"

of generalization:

- 1 – determination of main interrelated multiphysical phenomena and effects occurring during the operation of electrical machines and devices as well as their representation in graphical and table forms, and
- 2 – determination of main parameters to be obtained as outcomes of the coupled computer simulation from practical point of view.

The author has wide experience of the various fundamental and practical problems solution regarding design and operation of the variety of innovative electromagnetic devices such as rotation electrical machines, actuators, induction heaters, devices for pulsed magnetic fields generation, resistance welding machines, etc. The analysis presented in this paper is based on the author's experience as well as on research works carried out by other researchers. In the author's opinion the proposed general view on the fundamentals basics of pure and applied research in the area of multiphysical numerical modelling will be useful for two main "target groups":  
1 – "pure" researchers working in the field;  
2 – designers, manufacturers and even industrial operating personnel as "users" of obtained numerical results and proposed practical recommendations.

### II. INITIAL GENERAL CLASSIFICATIONS

#### A. Main multiphysical phenomena to be taken into account in numerical analysis

The author tries to propose a relatively "complete" list of interrelated physical phenomena and effects to be taken into account in numerical analysis of electrical machines and electrical devices. Of course, all readers working in the field of multiphysics are invited to take part in this investigation in order to extend the proposed list as well as to determine most important effects and effects to be neglected.

Why the author says: "A relatively "complete" list?"  
The answers are the following:

- 1 – at the first stage of the proposed wide discussion it is intended to consider only electromagnetic, thermal and mechanical (structural) phenomena. The author supposes this is enough to start our analysis. Effects of fluid dynamics nature should be examined later.
- 2 – we suppose (from the point of view of classification

of physical phenomena) acoustic that deals with the study of mechanical waves represents a "branch" of mechanics of solids [8], [9] and/or fluid mechanics [10]. Therefore, here we do not consider acoustics as a separate physical effect (despite of increased interest to simulate noise and vibrations of electrical machines as well as important numerical results obtained [11]).

3 – naturally, the author is unable to find and describe all existing multiphysical electromagnetic, thermal and mechanical phenomena. Therefore, in this paper we propose the "open" list of such effects and ask our colleagues to answer together the following questions: how many multiphysical phenomena do you know? who knows more? which effects are important? which ones can be neglected? In this connection we divide all variety of known physical effects into two groups:

- well-known phenomena to be currently taken into account in numerical simulation of an electromagnetic device or machine under research depending on its operation principle;
- phenomena which currently look like to be neglected or even "exotic" ones. But modern science and technology develop so fast. And ho knows? May be, in a few years some "exotic" physical effects will lie in the base of the operational principle of innovative machines, devices and technological processes.

#### B. Main parameters to be obtained as outcomes of the coupled computer simulation

Besides, the author elaborates a list of main parameters to be recommended as outcomes of the multiphysical numerical simulation of different electromagnetic devices from practical points of view. Here this is useful to divide the parameters of electromagnetic devices into a few groups describing their practical utilization. It seems to us it is possible to determine three main groups of parameters:

1 – electrical parameters describing the devices' operation from "point of view" of external electrical circuits. This group includes such quantities as voltage, current, frequency, inductances, resistances, etc.

2 – operational or technological parameters describing main characteristics of the devices' operation including technical data of technological equipment and processes. This group includes torques, forces, temperatures, operating duration, main temporal operation parameters of electromagnetic devices and technologies, and so on.

3 – structural parameters describing main designers' solutions such as windings' number of turns, air gaps, utilization of ferromagnetic structural parts, design and parameters of cooling system, etc.

Asserting the great importance of financial considerations in the process of the design, production and operation of various electromagnetic devices, the author currently does not analyse financial aspects of some designers' solutions and changes in technological parameters.

### III. GRAPHICAL REPRESENTATION OF COUPLING

A graphical form is extremely useful to clarify complicated interactions of coupled phenomena and fields of various physical natures. As an example we refer to [5] where a general representation of coupled problems is presented. In this paper, a more detailed diagram including a variety of known multiphysical electromagnetic,

thermal and mechanical processes is proposed (Fig. 1). Drawing the diagram the author did not take the effects of fluid dynamics nature into account and did not consider acoustics as a separate physical effect (see section II). The diagram (see Fig. 1) consists of three connected main elements (or "physical domains" as put forward in [5]) representing electromagnetic, thermal and mechanical phenomena. The numbers near the lines with arrows depict physical processes and effects listed below (see section IV). Naturally, the directions of the arrows demonstrate which main physical domain influences each of the others "by using" corresponding phenomena and effects of various physical natures.

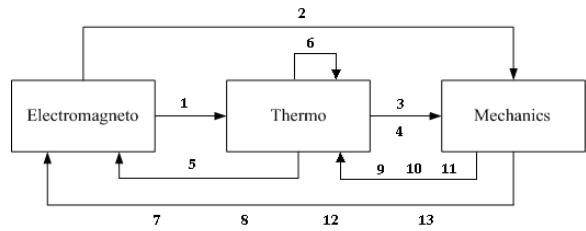


Fig. 1. Main "physical domains" of multi-physical simulations and their interactions

### IV. A LIST OF MULTIPHYSICAL PHENOMENA

On the base of generalization of the author's experience as well as of intensive analysis of research works carried out by other researchers, we propose the author's vision of the "initial version" of the list of multiphysical phenomena (Table I) to be considered in building the mathematical model of an electrical machine or device. As it was mentioned in section II, we consider well-known physical effects as well as "exotic" ones. The numbers of items in Table I correspond to the ones in Fig. 1.

Table 1

Multiphysical phenomena in electromagnetic devices	
Well-known phenomena	"Exotic" effects
1 – Joule losses [1, 3, 12-17]	9 – heat generation due to plastic mechanical deformations of metals [32]
2 – electromagnetic forces and torque [1, 3, 16, 18-24, 27]	10 – heat generation due to friction [33]
3 – the temperature distribution which alters the mechanical state of the structure [14, 25-28]	11 – contact phenomena (contact thermal resistance) [34, 35]
4 – mechanical properties depending on temperature [14, 26]	12 – contact phenomena (contact electrical resistance) [36]
5 – electromagnetic properties depending on temperature [14, 26, 29]	13 – coercive force dependence on the state of mechanical stress [37]
6 – temperature properties depending on temperature [14, 26]	
7 – new geometry of the structure which influences the electromagnetic field distribution [27]	
8 – velocity of movement (deformations) [3, 17, 26, 30, 31]	

So, at present we consider 13 multiphysical phenomena of various physical natures (electromagnetic, thermal and mechanical ones): 8 of them are well-known or "main" effects and 5 ones are "exotic". However, in some selected applications regarding innovative electromagnetic devices it

can be necessary to take into account one or even more of last ones. This is a subject of further discussions.

Besides, in addition to phenomena listed in Table 1 it is necessary to consider the following phenomena of various physical natures:

- first of all, magnetostriction [38-40]
- magnetization losses [17, 41-46]
- dependence of magnetic properties on steel heat treatment regimen (steel microstructure) [31, 47-49].

The author considers the presented list (see Table I and Fig. 1) as a first attempt to determine the most important effects to be taken into account in the numerical analysis of electrical machines and electromagnetic devices as well as to find phenomena which can be neglected. The author invites all colleagues working in the field of multiphysics to discuss and extend the proposed list.

#### IV. A LIST OF PARAMETRS TO BE DETERMINED

Electromagnetic, thermal, mechanical, fluid dynamical processes and fields in electromagnetic devices are described in general by corresponding equations of mathematical physics [50]. Solving them by using various numerical methods [51] we obtain temporal and spatial distributions of electromagnetic fields, current densities, losses, temperatures, mechanical stresses and deformations, and so on. However, it is obvious that from practical point of view it is not enough to have only the mentioned "pure" solutions of corresponding equations. The reason is clear: distributions of various physical fields and related quantities (such as losses) do not directly permit to design and produce highly effective constructions of electromagnetic devices as well as to propose their optimal operation modes. From industrial and technological viewpoint the final goal of applied research is to determine recommended rational structural and operational conditions and parameters of designed equipment by using intensive multiphysical computer simulation of the phenomena in the device under consideration.

In Table II the proposed list of main parameters to be recommended as outcomes of the coupled numerical simulation of various electromagnetic devices from practical points of view is presented. To carry out such an analysis a lot of publications have been analyzed and generalized (some of them are cited by the author). As it was mentioned in section II all the variety of parameters is divided into three groups (electrical parameters, operational or technological ones, and structural or "pure" designer's solutions).

We analyze most widely used types of electromagnetic and other electrical engineering devices (see Table II):

- 1 – rotation electrical machines (an example of the structure under consideration: a synchronous turbogenerator rotor [53] presented in Fig. 2);
- 2 – induction heaters (see, for instance, Fig. 3 [86]);
- 3 – actuators (Fig. 4 [25]);
- 4 – electrophysical equipment for high pulsed magnetic fields generation (for pure scientific and technological purposes);
- 5 – selected electronic elements (an example is presented in Fig. 5 [81]);
- 6 – resistance welding machines.

Naturally, electronic components (such as thermistors and thyristors) and resistance welding technological equipment are formally not "electromagnetic devices" but

the author decided to include them into the presented analysis because of their importance and wide utilization in modern industry and technology.

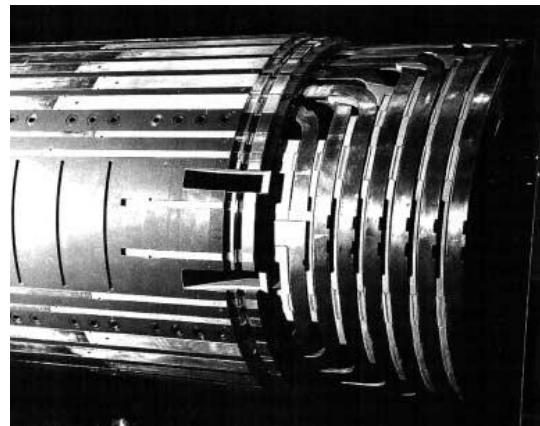


Fig. 2. A synchronous turbogenerator rotor [53]

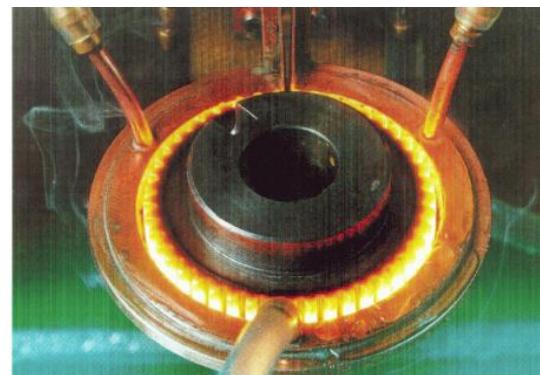


Fig. 3. Induction heating at Steremat Elektrowärme GmbH & Co. KG, Berlin, Germany [86]

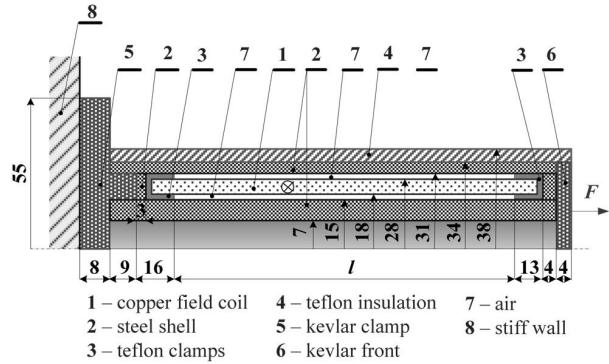


Fig. 4. Arrangement of a thermoelastic actuator [25]

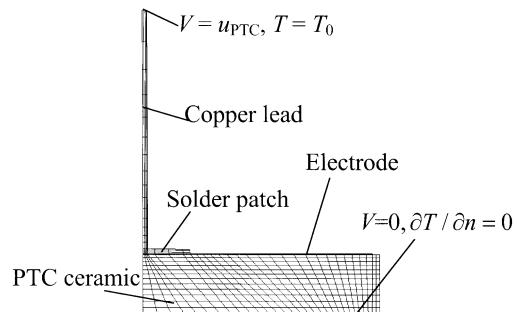


Fig. 5. One half of the axisymmetric model of the PTC thermistor [81]

In the author's opinion a list of electromagnetic and other devices under consideration included in Table II could be extended. We invite all colleagues working in the field of applied electromagnetics to take part in such the analysis. And, of course, we will be grateful for all colleagues' proposals regarding inclusion of additional parameters to be determined as outcomes of multiphysical numerical simulation.

## V. SUMMARY AND CONCLUSIONS

In this paper<sup>1</sup> the author's view on the possibility to compile a relatively "complete" list of coupled multiphysical electromagnetic, thermal and mechanical phenomena to be taken into account in numerical analysis of electrical machines and other electrical devices is presented. The improved graphical representation of coupling is proposed. A number of well-known and "exotic" effects are listed and shortly described. Besides, the author proposes

a list of main parameters to be recommended as results of the coupled (multiphysical) numerical simulation of various electromagnetic devices from practical points of view. Electrical, operational and structural parameters of electrical machines, induction heaters, actuators and other devices are listed. And, finally, the author invites all colleagues working in the field of multiphysics to discuss and extend the proposed lists.

## VI. ACKNOWLEDGEMENT

The research was funded by the Austrian Science Fund (FWF): Lise Meitner Project M1195-N22 on Coupled Numerical Analysis of Electrical Engineering Devices (01.09.2012 – 31.08.2012).

<sup>1</sup>The short version of this paper is published in [87].

Table 2

A list of main parameters to be recommended as outcomes of electromagnetic devices numerical simulation from practical points of view						
Type of parameters ↓	Rotation electrical machines	Induction heaters	Actuators	Type of electromagnetic devices	Electronical components (thermistors, thyristors, thermoelectric generators)	Resistance welding machines
Electrical	<ul style="list-style-type: none"> <li>voltage and current in the machine's windings (for motors and generators) [13, 16, 52-57]</li> <li>machines' electrical parameters (e.g. resistances, inductances) [13, 57-60]</li> <li>machines' lumped thermal model parameters (e.g. thermal contact resistances, thermal conductivities) [61]</li> <li>efficiency [62]</li> <li>losses and their minimization [63-67]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>operating voltage or current in the inductor [14, 27, 72-74]</li> <li>frequency of electromagnetic oscillations in the inductor [27, 30, 74]</li> <li>power and efficiency [27, 30]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>operating voltage or current in the field coil [25, 34]</li> <li>frequency of electromagnetic oscillations in the field coil [25]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>amplitude value of operating voltage or current in the inductor (coil) [14, 27, 76]</li> <li>energy stored in the capacitors [27, 77]</li> <li>frequency of electromagnetic oscillations in the inductor (coil) [78]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>applied voltage [79-82] and its time evolution [82]</li> <li>current flowing through the element [79-82] and its time evolution [82]</li> <li>frequency of the pulses [82]</li> <li>efficiency [80]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>voltage on electrodes [83, 84]</li> <li>type of power supply (DC, AC, frequency) [85]</li> </ul>
Operational and technological	<ul style="list-style-type: none"> <li>torque and forces [3, 11, 20, 22, 52, 65, 69]</li> <li>temperature distribution (don't exceed permitted working temperature of the insulation) [63-65, 68]</li> <li>level of noise and vibrations [11, 69, 70]</li> <li>in-service time of electrical machines at some operating conditions (for example, at the turbo-generator line-to-line short circuit) [16, 63]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>temperature distribution in treated workpiece [14, 27, 28, 30, 72, 73, 75]</li> <li>duration of heating and cooling of treated workpieces [14, 27, 28, 30, 31, 49, 72, 73, 75]</li> <li>required (from technological point of view) velocity of heating and/or cooling [14, 31, 49]</li> <li>velocity of movement of the treated workpiece or inductor [17, 30, 31]</li> <li>mechanical stresses and deformations of treated workpiece and inductor, including absence or presence of plastic ones [14, 28, 30, 72, 73, 75]</li> <li>temperature distribution in the inductor (coil) to use appropriate insulating materials [27]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>operation duration [25, 34]</li> <li>forces and/or torque values [25, 34]</li> <li>mechanical stresses and deformations of structural parts [25, 34]</li> <li>temperature distribution in structural parts [25, 34]</li> <li>duration of heating and cooling of the working part [25, 34]</li> <li>velocity of heating and/or cooling [25, 34]</li> <li>velocity of movement of structural parts [26]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>operation duration [14, 27, 76]</li> <li>temperature distribution in the inductor (coil) and treated workpieces [14, 27, 76]</li> <li>mechanical stresses and deformations of the inductor (coil) and treated workpieces [14, 27, 76]</li> <li>duration of heating and cooling of the working part [25, 34]</li> <li>velocity of heating and/or cooling [25, 34]</li> <li>velocity of movement of structural parts [26]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>temperature distribution (don't exceed permitted working temperature of the element) [79-82]</li> <li>mechanical stresses and deformations (to prevent fracture) [79, 80]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>temperature distribution [83, 84]</li> <li>duration of welding [83, 84]</li> <li>duration of cooling of welded parts [85]</li> <li>pressure on electrodes [83, 84]</li> <li>mechanical stresses and deformations of welded pieces to prevent fracture [84, 85]</li> <li>mechanical stresses and deformations of electrodes [84]</li> </ul>

Continue of Table 2

Type of parameters ↓	Rotation electrical machines	Induction heaters	Actuators	Type of electromagnetic devices	Electronical components (thermistors, thyristors, thermoelectric generators)	Resistance welding machines
Structural (for designers)	<ul style="list-style-type: none"> <li>parameters and design of air, water or hydrogen cooling systems of stator and rotor of various electrical machines [16, 71]</li> <li>geometry of some structural parts (e.g. turbogenerator damper system, rotor slot wedges [13, 16])</li> <li>rational choice of materials for some structural parts (e.g. turbogenerator slot wedges in rotor and stator [66])</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>number of turns of inductor and its design [27, 30, 72, 74, 75]</li> <li>air gap value and geometry [27, 30, 75]</li> <li>type of quenching media or coolants (air, water, oil, water-polymer liquids) [31, 49]</li> <li>velocity of quenching media or coolants [31, 49]</li> <li>utilization of ferromagnetic cores [27, 30, 75]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>number of turns of field coil and its design [25, 34]</li> <li>rational choice of materials for some structural parts [25, 34]</li> <li>type of quenching media or coolants (air, water, oil) [25, 34]</li> <li>velocity of quenching media or coolants [25, 34]</li> <li>utilization of ferromagnetic structural parts [26]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electrophysical devices for high pulsed magnetic fields generation and technological applications</li> <li>number of turns of inductor (coil) and its design [27, 76]</li> <li>air gap value [27]</li> <li>type of quenching media or coolants (air, water, oil) [76]</li> <li>velocity of quenching media or coolants [76]</li> <li>utilization of ferromagnetic cores [27]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>geometrical parameters of the element [79, 80, 82]</li> <li>ventilation parameters [80, 82]</li> <li>utilization of casing [80]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>geometrical parameters of electrodes [83, 84]</li> <li>type of quenching media or coolants (air, water, oil) [85]</li> <li>velocity of quenching media or coolants [85]</li> </ul>

## VII. REFERENCES

- Hameyer, K., Driesen, J., De Gersem, H., and Belmans, R., "The classification of coupled field problems," IEEE Transactions Magnetics, vol. 35, pp. 1618-1621, No. 3, 1999.
- van Riesen, D., Henrotte, F., Schlenck, Ch., and Hameyer, K., "Coupled simulations in the design of electrical machines," Int. Conf. on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2005, Santorini Island, Greece, 25-27 May, 2005.
- Kumbhar, G.B., Kulkarni, S.V., Escarela-Perez, R., and Campero-Littlewood, E., "Applications of coupled field formulations to electrical machinery," COMPEL, vol. 26, pp. 489-523, No. 2, 2007.
- Jaindl, M., Kutschera, R., Köstinger, A., and Magele, Ch., "Numerical optimization framework for weakly coupled multiphysical problems," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 344-347, 2010.
- Schmidt, E., "Finite element analysis of electrical machines and transformers – state of the art and future trends," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 398-405, 2010.
- Du Terrail Couvat, Y., Gagnoud, A., Morandini, J., and Triwong, P., "FEM modelling by multi meshes and multi equations coupling," Proc. 13<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2008, pp. 235-239, 2008.
- Vokas, Ch. and Kasper, M., "FEM implementation and p-adaptation of coupled problems," Proc. 13<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2008, pp. 336-340, 2008.
- Stephens, R.W.B. and Bate, A.E., "Acoustics and Vibrational Physics," (2nd ed.), London: Edward Arnold, 1966.
- Beltzer, A.I., "Acoustics of Solids," Springer, 1988.
- Crighton, D.G., "Acoustics as a branch of fluid mechanics," Journal of Fluid Mechanics, vol. 106, pp. 261-298, May 1981.
- van der Giet, M., Rothe, R., Gracia, M.H., and Hameyer, K., "A novel approach to estimate harmonic force excitation for noise diagnosis of electrical machines," ICS Newsletter, vol. 16, No. 1, March 2009.
- Brauer, J.R., "Magnetic Actuators and Sensors," New York, NY: Wiley, 2006.
- Kulig, T.S., Buckley, G.W., Lambrecht, D., and Liese, M., "A new approach to determine transient generator winding and damper currents in case of internal and external faults and abnormal operation," IEEE Transactions Energy Conversion, vol. 5, pp. 70-78, No. 1, 1990.
- Pantelyat, M.G., "Coupled electromagnetic, thermal and elastic-plastic simulation of multi-impulse inductive heating," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 9, pp. 11-24, 1998.
- Shulzhenko, N.G., Gontarowsky, P.P., Matyukhin, Yu.I., Pantelyat, M.G., Doležel, I., and Ulrych, B., "Finite element analysis of electromagnetic, thermal and stress-strain state of joints during induction-heating based assembly and disassembly," Proc. 11<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Seggau Castle (Graz), Austria, September 2004, pp. 334-339, 2004.
- Klempner, G. and Kerszenbaum, I., "Handbook of Large Turbo-generator Operation and Maintenance," IEEE Press Series on Power Engineering, (2nd ed.), Wiley, 2008.
- Monzel, C. and Henneberger, G., "Temperature solver for highly nonlinear ferromagnetic materials for thin moving sheets in transversal flux induction heating," IEEE Trans. Magnetics, 38, pp. 937-940, 2002.
- Schiffer, A. and Ivanyi, A. "Harmonic vibration calculation and measurement of transformer sheets," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 412-417, 2010.
- Yatchev, I.S., Gergova, Z.K., and Hinov, K.L., "Dynamic simulation of a permanent magnet needle actuator," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 348-351, 2010.
- Pantelyat, M.G., Bíró, O., and Stermecki, A., "Electromagnetic forces in synchronous turbogenerator rotor slot wedges," Proc. Joint Conference 3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Nonlinear Dynamics and Synchronization (INDS'2011) & 16<sup>th</sup> Int. Symp. On Theoretical Elec. Eng., Klagenfurt, Austria, July 2011, pp. 112-115, 2011.
- Rausch, M., Gebhardt, M., Kaltenbacher, M., and Landes, H., "Magnetomechanical field computations of a clinical magnetic resonance imaging (MRI) scanner," Proc. 10<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2002, pp. 151-156, 2002.
- van der Giet, M., Franck, D., Henrotte, F., and Hameyer, K., "Comparative study of force computation methods for acoustic

- analyses of electrical machines," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 392-397, 2010.
23. Ren, Z., "Comparison of different force calculation methods in 3D finite element modelling," IEEE Transactions Magnetics, vol. 30, pp. 3471-3474, No. 5, 1994.
24. Fireteanu, V. and Tudorache, T., "Electromagnetic forces in transverse flux induction heating," IEEE Transactions Magnetics, vol. 36, pp. 1792-1795, No. 4, 2000.
25. Doležel, I., Karban, P., Ulrych, B., Pantelyat, M.G., Matyukhin, Yu.I., Gontarowsky, P.P., and Shulzhenko, N.G., "Limit operation regimes of actuators working on principle of thermoelasticity," IEEE Transactions on Magnetics, 44, issue 6, pp. 810-813, 2008.
26. Doležel, I., Kotlan, V., Krónerová, E., and Ulrych, B., "Induction thermoelastic actuator with controllable operation regime," COMPEL, vol. 29, pp. 1004-1014, No. 4, 2010.
27. Pasca, S. and Fireteanu, V., "FE analysis of successive induction heating and magnetoforming of thin magnetic steel sheets," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 356-361, 2010.
28. Pantelyat, M.G. and Féliachi, M., "Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals," The European Physical Journal Applied Physics, vol. 17, pp. 29-33, 2002.
29. Pantelyat, M.G. and Shulzhenko, N.G., "On approximation for magnetization curves," Proc. 12<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2006, pp. 96-99, 2006.
30. Iatcheva, I.I., Stancheva, R.D., and Kumov, G.C., "Parameters identification of induction heating systems," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 352-355, 2010.
31. Barglik, J., Doležel, I., Karban, P., and Ulrych, B., "Modeling of continual induction hardening in quasi-coupled formulation," COMPEL, vol. 24, pp. 251-260, No. 1, 2005.
32. Rusinek, A. and Klepaczko, J.R., "Experiments on heat generated during plastic deformation and stored energy for TRIP steels," Materials and Design, 30, No. 1, pp. 35-48, 2009.
33. Nijhuis, A., Noordman, N.H.W., Shevchenko, O.A., ten Kate, H.H.J., and Mitchell, N., "Electromagnetic and mechanical characterisation of ITER CS-MC conductors affected by transverse cyclic loading, Part 3: mechanical properties," IEEE Trans. Applied Superconductivity, 9, pp. 165-168, 1999.
34. Doležel, I., Karban, P., Ulrych, B., Pantelyat, M., Matyukhin, Y., and Gontarowsky, P. "Computer model of thermoelastic actuator solved as coupled contact problem," COMPEL, vol. 26, pp. 1063-1072, No. 4, 2007.
35. Schlykov, J.P., Gorin, B.A., and Cerevskij, S.N., "Contact Thermal Resistance," Energia, 1977 (in Russian).
36. Takahashi, N., Miyagi, D., Shinagawa, H., Doi, Y., "Eddy current losses of segmented Nd-Fe-B sintered magnets without insulation under various conditions," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 1-4, 2010.
37. Muzhitskiy, V., Popov, B., and Bezlyudko, G., "Estimation of stress, fatigue and capacity of welds by measurements of magnetic characteristic – coercive force," Proc. 16th World Conference on Non Destructive Testing (WCNDT), Montreal, Canada, August-September 2004, 7 p.
38. Boulassel, A., Mekideche, M.R., Belli, Z., Kimouche, A., and Bouchekhou, H., "Contribution of Magnetostriction to Vibrations and Noises in Electrical Machines," in: "Computer Field Models of Electromagnetic Devices," Amsterdam: IOS Press, pp. 708-717, 2010.
39. Kaltenbacher, M., Meiler, M., and Ertl, M., "Physical modeling and numerical computation of magnetostriction," Proc. 13<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2008, pp. 141-146, 2008.
40. Belahcen, A., "Magnetoelasticity, Magnetic Forces and Magnetostriction in Electrical Machines," Doctoral thesis, Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, Report 72, Espoo 2004, 115 p.
41. Darabi, A., Ghazi, M.E., Lesani, H., and Askarinejad, A., "Calculation of local iron loss in electrical machines using finite elements method," Engineering Letters, 15, No. 2, 2007.
42. Krings, A. and Soulard, J., "Overview and comparison of iron loss models for electrical machines," the International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER 2010), Monaco, March 2010.
43. Komeza, K., López-Fernández, X.M., and Lefik, M., "Computer modelling of 3D transient thermal field coupled with electromagnetic field in three-phase induction motor on load," COMPEL, vol. 29, pp. 974-983, No. 4, 2010.
44. Kasai, S. and Amemiya, N., "Numerical analysis of magnetization losses in finite-length multifilamentary YBCO coated conductors," IEEE Trans. Applied Superconductivity, 15, pp. 2855-2858, 2005.
45. Flohrer, S. and Herzer, G., "Magnetization loss of nanocrystalline soft magnets," Journal of Physics: Conference Series, 144, No. 1, 2009.
46. Lambrecht, D., "Superconducting turbogenerators: status and trends," Cryogenics, 25, No. 11, pp. 619-627, 1985.
47. Ryu, K.S., Nahm, S.H., Kim, Y.B., Yu, K.M., and Son, D., "Dependence of magnetic properties on isothermal heat treatment time for 1Cr-1Mo-0.25V steel," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, issue 222, 128-132, 2000.
48. Ajus, C., Tavares, S.S.M., Silva, M.R., and Corte, R.R.A., "Magnetic properties and retained austenite quantification in SAE 4340 steel," Revista Matéria, 14, No. 3, pp. 993-999, 2009.
49. Doležel, I., Barglik, J., Sajdak, C., Škopek, M., and Ulrych, B., "Modelling of induction heating and consequent hardening of long prismatic bodies," COMPEL, vol. 22, pp. 79-87, No. 1, 2003.
50. Tikhonov, A.N. and Samarskii, A.A., "Equations of Mathematical Physics," Dover Publications, 1990.
51. Binns, K.J., Lawrenson, P.J., and Trowbridge, C.W., "The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields," John Wiley & Sons, New York, 1992.
52. Kisielewski, P. and Antal, L., "Transient currents in turbogenerator for the sudden short circuit," Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napedów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 11 pages, No. 63, 2009.
53. Drubel, O., "Die Berechnung der elektromagnetischen und thermischen Beanspruchung von Turbogeneratoren während elektrischer Störfälle mittels Finiter-Differenzen-Zeitschritt-Methode," Electrical Engineering, vol. 82, pp. 327-338, 2000.
54. Stermecki, A., Ticar, I., Zagradisnik, I., and Kitak, P., "FEM-based design of an induction motor's part winding to reduce the starting current," IEEE Trans. Magn., vol. 42, pp. 1299-1302, No. 4, April 2006.
55. Yamazaki, K. and Watanabe, Y., "Interbar current analysis of induction motors using 3-D finite element method considering lamination of rotor core," IEEE Trans. Magn., vol. 42, pp. 1287-1290, No. 4, April 2006.
56. Stermecki, A., Bíró, O., Preis, K., Rainer, S., and Ofner, G., "Modelling the electrical machine end-winding current excitation using T,  $\Phi$ - $\Phi$  formulation," Abstracts 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, p. 6, 2010.
57. Marco, A. and Arjona, L., "Parameter calculation of a turbogenerator during an open-circuit transient excitation," IEEE Transactions Energy Conversion, vol. 19, pp. 46-52, No. 1, 2004.
58. Demerdash, N.A. and Nehl, T.W., "Use of numerical analysis of nonlinear eddy current problems by finite elements in the determination of parameters of electrical machines with solid iron rotors," IEEE Transactions Magnetics, vol. 15, pp. 1482-1484, No. 6, 1979.
59. Guo, Y.G., Zhu, J.G., and Lu, H.Y., "Accurate determination of parameters of a claw-pole motor with SMC stator core by finite-element magnetic-field analysis," IEE Proc.-Electr. Power

- Appl., vol. 153, pp. 568-574, No. 4, 2006.
60. Garbe, E., Helmer, R., and Ponick, B., "Modelling and fast calculating the characteristics of synchronous machines with the finite element method," Proc. XVIII Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM'2008), Vilamoura, Portugal, September 2008, DOI: 10.1109/ICELMACH.2008.4799912, 6 pages, 2008.
61. Mellor, P.H., Roberts, D., and Turner, D.R., "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design," IEE Proceedings-B, vol. 138, pp. 205-218, No. 5, 1991.
62. du Peloux, B. and Lacombe, G., "Engineering-focused software for the design of the drive of electrical machines," Proc. XVIII Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM'2008), Vilamoura, Portugal, September 2008, DOI: 10.1109/ICELMACH.2008.4800214, 4 pages, 2008.
63. Bhargava, S.C., "Negative-sequence currents, losses and temperature rise in the rotor of a turbogenerator during transient unbalanced operation," Electric Machines and Power Systems, vol. 8, pp. 155-168, 1983.
64. Hammons, T.J., "Comparison of losses and heating in generator rotors following severe supply system disturbances," IEEE Transactions Energy Conversion, vol. 5, pp. 703-712, No. 4, 1990.
65. Barański, M., Demenko, A., Łyskawiański, W., and Szeląg, W., "Finite element analysis of transient electromagnetic-thermal phenomena in a squirrel cage motor," Proc. XXI Symp. Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits (EPNC'2010), Dortmund and Essen, Germany, June-July 2010, 2 p., 2010.
66. Pantelyat, M.G. and Shulzhenko, N.G., "Finite element analysis of electromagnetic field and losses in a turbogenerator rotor," Proc. 6<sup>th</sup> International Conference on Computational Electromagnetics (CEM'2006), Aachen, Germany, April 2006, pp. 151-152, 2006.
67. Pantelyat, M.G., Saphonov, A.N., and Shulzhenko, N.G., "Finite element analysis of the electromagnetic field in synchronous turbogenerator rotor slot wedges," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 76-80, 2010.
68. Tari, M., Yoshida, K., Sekito, S., Brütsch, R., Allison, J., and Lutz, A., "HTC insulation technology drives rapid progress of indirect-cooled turbo generator unit capacity," IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 2001, 6 pages, 2001.
69. Weilharter, B. and Bíró, O., "Computation of the noise radiation of an induction machine using 3D FEM/BEM," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 101-106, 2010.
70. Stermecki, A., Bíró, O., Lang, H., Ofner, G., Preis, K., and Rainer, S., "Analysis of synchronous generator end-winding deformations using 3-D time-harmonic FEM," Proc. XIX Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM'2010), Rome, Italy, September 2010, DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5608154, 5 pages, 2010.
71. Hettegger, M., Streibl, B., Bíró, O., and Neudorfer, H., "Measurement and simulation of the heat transfer on end windings of an induction machine," Proc. 14<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2010, pp. 97-100, 2010.
72. Zgraja, J. and Pantelyat, M.G., "Induction heating of large steel disks: coupled electromagnetic, thermal and mechanical simulation," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 10, pp. 303-313, 1999.
73. Shulzhenko, N.G., Gontarowsky, P.P., Matyukhin, Yu.I., Pantelyat, M.G., Doležel, I., Ulrych, B., and Beneš, K., "Computer modeling of induction heating-based assembly and disassembly of shrink fits," Acta Technica CSAV, vol. 49, pp. 169-183, 2004.
74. Iatcheva, I.I., Stancheva, R.D., Tahirlov, H.P., and Lilianova, I.T., "Comparative analysis of theoretical and experimental investigations of induction heating device," Proc. 13<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 2008, pp. 84-89, 2008.
75. Gontarowsky, P.P. and Pantelyat, M.G., "Low deforming induction heating of locomotive wheel: coupled electromagnetic, thermal and mechanical simulation," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 16, pp. 91-98, 2002.
76. Pantelyat, M.G., "Numerical modeling of the thermal-stressed state of cooled pulsed solenoids of electrophysical apparatus," International Applied Mechanics, vol. 35, pp. 420-425, No. 4, 1999.
77. Crepaz, G., Lupi, S., Ramous, E., and Tiziani, A., "High-frequency induction hardening with controlled capacitors-discharge pulse-operation processes," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 22, pp. 216-222, No. 2, 1986.
78. Pantelyat, M.G., "Numerical Solution of Axisymmetrical Magneto-Thermo-Mechanical Problems," (in Russian), Candidate of Science Thesis, Kharkov: IPMach, 151 pages, 1990.
79. Bíró, O., Preis, K., Dyczij-Edlinger, R., Badics, Zs., and Riedler, H., "Coupled electric, thermal and elastic simulation of BaTiO<sub>3</sub> PTC thermistor," International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, vol. 3, pp. 151-155, 1992.
80. Preis, K., Bíró, O., Dyczij-Edlinger, R., Richter, K.R., Badics, Zs., Riedler, H., and Stögner, H., "Application of FEM to coupled electric, thermal and mechanical problems," IEEE Transactions Magnetics, vol. 30, pp. 3316-3319, No. 5, 1994.
81. Preis, K., Bíró, O., Supancic, P., and Tičar, I. "FEM simulation of thermistors including dielectric effects," IEEE Transactions Magnetics, vol. 39, pp. 1733-1736, No. 3, 2003.
82. Doležel, I., Dvořák, P., Kalčík, K., and Valouch, V., "Limit operation regimes of selected power semiconductor elements," Proc. 12<sup>th</sup> Int. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC'2006), Portoroz, Slovenia, August-September 2006, pp. 50-53, 2006.
83. Pantelyat, M.G., "Resistance welding of metals: coupled electric and thermal fields simulation," Proc. 8<sup>th</sup> Int. IGTE Symp. on Num. Field Calc. in Elec. Eng., Graz, Austria, September 1998, pp. 476-479, 1998.
84. Pantelyat, M.G., "Coupled electric, thermal and mechanical finite element simulation of resistance welding of metals," Symposium Record 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Electric and Magnetic Fields (EMF 2000), Ghent, Belgium, May 2000, pp. 49-50, 2000.
85. Hubbard, C.N., "High-frequency resistance welding of structural shapes," IEEE Transactions Industry Applications, vol. 10, pp. 485-495, No. 4, 1974.
86. <http://www.sterematew.de>
87. Pantelyat, M.G., "Multiphysics in electromagnetic devices simulation and design: an attempt of generalization," Acta Technica, vol. 57, pp. 127-142, No. 2, 2012.

Received 21.01.2013

*Michael G. Pantelyat*

Department for Electrical Apparatuses

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"

Frunze Str. 21, UA-61002 Kharkov, Ukraine

e-mail: m150462@yahoo.com

*Pantelyat M.G.*

**Multiphysical numerical analysis of electromagnetic devices: state-of-the-art and generalization.**

In this paper, an analysis of state-of-the-art and an attempt to generalize the basic principles of multiphysical (coupled) computer simulation of various electromagnetic devices (electrical machines, induction heaters, actuators, electrophysical devices, etc.) are presented. The analysis is based on the author's wide experience in solving various practical problems regarding design and operation of a variety of innovative machines and devices as well as on studies carried out by other researchers.

**Key words – electromagnetic devices, multiphysics, computer simulation.**

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

*Атомні електростанції для України залишаються основними електрогенеруючими підприємствами. Тому проведення робіт по забезпеченню їх надійності і оптимізації режимів роботи актуально. Надійна робота АЕС – важлива технічна, економічна і екологічна проблема, рішення якої багато в чому визначається надійністю роботи електроустаткування, а саме, надійністю роботи електродвигунів приводів технологічних процесів АЕС.*

*Атомные электростанции для Украины остаются основными электрогенерирующими предприятиями. Поэтому проведение работ по обеспечению их надежности и оптимизации режимов работы актуально. Надежная работа АЭС – важная техническая, экономическая и экологическая проблема, решение которой во многом определяется надежностью работы электрооборудования, а именно, надежностью работы электродвигателей приводов технологических процессов АЭС.*

Атомные электростанции (АЭС) конкурентоспособны и превосходят по энерговооруженке и безопасности тепловые электростанции (ТЭС) на органическом топливе, а единичные мощности агрегатов АЭС давно превысили суммарную мощность установленных на ТЭС генераторов. В настоящее время АЭС вырабатывают примерно 45 % всей производимой в мире электроэнергии. На территории Украины расположены четыре АЭС, доля вырабатываемой на них электроэнергии составляет около 52 % электроэнергии, вырабатываемой в Украине [1, 2].

К преимуществам атомной энергетики следует отнести то, что она, при нормальной эксплуатации, не выбрасывает в атмосферу оксиды серы и азота, приводящих к кислотным дождям, а также газы, вызывающие парниковый эффект. Поэтому можно считать, что АЭС – достаточно оптимальные источники электроэнергии, которые наносят меньший ущерб экологии Земли, чем ТЭС. Кроме этого, к преимуществам АЭС необходимо отнести и достаточно низкую себестоимость вырабатываемой электроэнергии, а также возможность размещения АЭС в местах плотного проживания потребителей [2].

Вместе с тем развитие ядерной энергетики выдвинуло серьезную проблему – необходимость вести постоянную работу по предотвращению аварий на АЭС, т.к. технические системы большой сложности и большой мощности, к которым и относятся объекты ядерной энергетики, имеют определенную степень риска возникновения аварий. При этом даже единственная авария может иметь катастрофические последствия. К сожалению, почти шестидесятилетняя история ядерной энергетики характеризуется не только крупными достижениями, но и рядом аварий, самыми тяжелыми из которых являются аварии на АЭС "Три-Майл-Айленд" (США, 1979 г.) и Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 г.), а теперь и авария на АЭС Фукусима-1 – крупная радиационная авария 7-го уровня по шкале INES, которая произошла 11 марта 2011 г. в результате сильнейшего землетрясения в Японии и последовавшего за ним цунами. Землетрясение и удар цунами вывели из строя внешние резервные средства электроснабжения, что явилось причиной отказа всех систем нормального и аварийного охлаждения и привело к расплавлению активной зоны реакторов на трех энергоблоках (из 6 энергоблоков электростанции) уже в первые дни развития аварии [2].

Обеспечение крупномасштабного развития

атомной энергетики требует разработки и внедрения новых ядерных технологий, способных взять на себя удовлетворение существенной части прироста электроэнергетических мощностей в стране, стабилизируя (или снижая) при этом потребление органических видов топлива. Проверка выполнения обязательств в рамках соглашений по международной политике нераспространения ядерного оружия и мирного использования атомной энергии является одной из главных задач Международного агентства по ядерной энергии, (МАГАТЭ), созданного в 1957 году по решению Генеральной ассамблеи ООН. Членами этой организации выступают свыше 150 государств мира. Соглашение между Украиной и МАГАТЭ о применении гарантий было подписано в 1995 г. в Вене после присоединения нашей страны к Договору о нераспространении ядерного оружия.

По оценкам МАГАТЭ, НАЭК Украины "Энергатом" "Запорожская АЭС" (одна из 4-х АЭС Украины) признана одной из трех лучших станций мира, на которой полностью достигнуты цель и гарантии агентства. Их основные задачи включают в себя проверку выполнения взятых государствами обязательств по нераспространению ядерных материалов, строгий контроль над их движением и невозможностью несанкционированного доступа. Включение Запорожской АЭС в тройку лучших ядерных установок мира, означает, что из множества ядерных объектов украинская станция, наряду с двумя другими в мире, лидировала в части обеспечения полного выполнения гарантий. Столь высокую оценку украинская атомная станция получила впервые. Но за 25 лет эксплуатации крупнейшая в Европе АЭС неоднократно добивалась высоких международных оценок результатов своей деятельности в различных областях, зарекомендовав себя надежным, безопасным, экономически выгодным и экологически чистым предприятием. На ЗАЭС впервые в 1992 г. был введен в действие полномасштабный тренажер для обучения оперативного персонала. Наряду с этим одной из главных проблем ЗАЭС по-прежнему остается содержание сухого хранилища отработанного ядерного топлива (СХОЯТ). Остальные АЭС Украины также основной задачей своей деятельности считают обеспечение надежной и безопасной работы.

Повышение маневренности и надежности энергоблоков АЭС может быть достигнуто при надлежа-

щем решении задачи тепловой защиты всего комплекса оборудования. В настоящее время подход к тепловой защите электродвигателей только путем нормирования тепловых потерь и температуры изолированной поверхности является недостаточным, хотя это позволяет поддерживать потери тепла на необходимом уровне. Нельзя пренебрегать значением тепловой защиты с точки зрения влияния ее на распределение температур при различных режимах работы оборудования. Это особенно четко проявляется в условиях стационарного режима и остыивания, кроме того, играет существенную роль при формировании температурных полей в пусковых режимах [3]. Это требует создание надежной, точной, быстродействующей системы температурного контроля. Различные температурные состояния элементов и узлов энергоблока в одни и те же моменты времени остыивания существенно увеличивают затраты на эксплуатацию оборудования блока и продолжительность пуска турбины и турбогенератора (ТГ).

При проведении поверки теплового состояния электродвигателей используют различные средства измерений:

- эталонные ртутные стеклянные термометры 2-го разряда;
- эталонные платинородий-платиновые термоэлектрические преобразователи (ТП) типа ППО 1, 2 и 3-го разрядов;
- эталонные платинородиевые ТП типа ПРО2-го и 3-го разрядов;
- поверочная установка, включающая в себя двухрядный или однорядный потенциометр постоянного тока класса точности не ниже 0,01;
- современные микропроцессорные средства измерений термо-ЭДС (ТЭДС) рабочих ТП.

При этом возникает необходимость исследовать условия эксплуатации и режимы работы энергоблока. Одним из таких режимов является эксплуатация с минимальными термоциклическими напряжениями оборудования, за счет уменьшения циклических изменений температур и давления. Значимость оценки состояния термоизоляции двигателей блока АЭС в настоящее время существенно возрастает в связи с резким ростом частых остановов и пусков. Достаточно быстрый темп остыивания различных узлов и деталей двигателей способствует более глубокому остыанию в период коротких остановов, а, следовательно, ограничивает скорость последующего пуска. В настоящее время подход к тепловой защите электродвигателей (ЭД) только путем нормирования тепловых потерь и температуры изолированной поверхности является недостаточным, хотя это позволяет поддерживать потери тепла на необходимом уровне [4].

Повышение маневренности и надежности энергоблоков в условиях частых остановов и пусков, очевидно, может быть достигнуто при надлежащем решении задачи тепловой защиты всего комплекса электрооборудования. Тепловая защита ЭД энергоблоков должна выполняться с учетом всех перечисленных факторов. Поэтому проектирование теплозащиты необходимо осуществлять в несколько этапов.

На первом этапе определяется перечень узлов ЭД, влияющих на маневренность работы блока, потом выполняются предварительные тепловые расчеты по определению конструкции и толщины термоизолято-

ра с учетом нормативных потерь тепла и температуры поверхностей. Структурная схема расчета термоизоляции ЭД, влияющая на надежность оборудования и маневренность работы блока, показана на рис. 1.

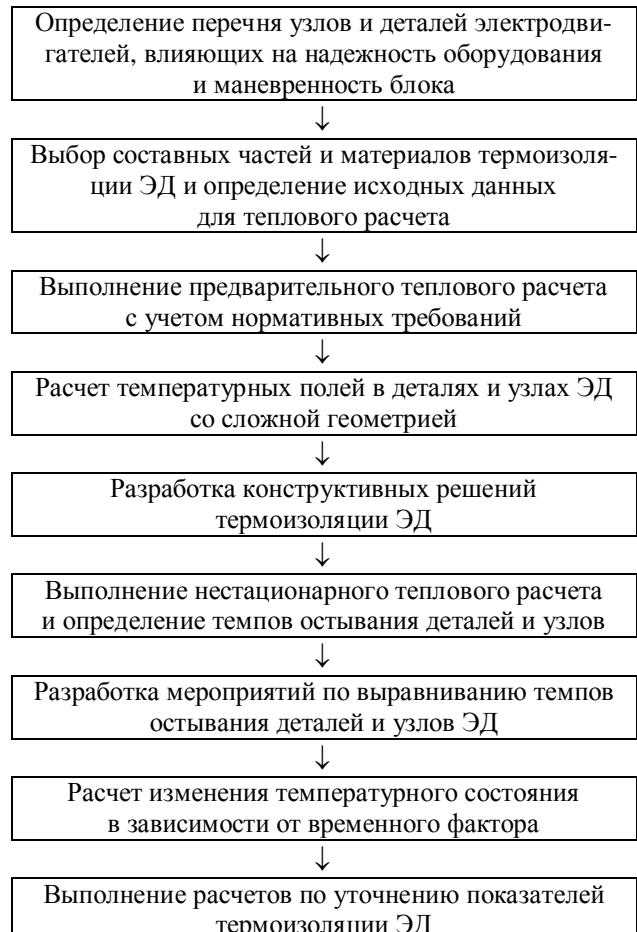


Рис. 1. Перечень узлов и деталей электродвигателей, влияющих на надежность и маневренность блока

Следующим этапом является проверка выполнения условий равномерности распределения температурных полей в деталях и узлах со сложной геометрией, в случае несоблюдения этих условий необходимо провести дополнительные конструктивные и тепловые расчеты.

Контроль технического состояния ТГ обычно сводится к контролю температуры наиболее ответственных узлов машины: обмоток, стали сердечника, хладагентов и т.д. Реально этот контроль состоит в сравнении текущих температур с их предельно допустимыми значениями – "установками", при достижении которых на щит управления выдается предупредительный сигнал. Далее оператор должен принимать решение об остановке машины, ограничении нагрузки и т.д. При огромном потоке информации, поступающей на щит управления от различных систем, велика вероятность неправильной ее интерпретации и, как следствие, принятия оператором ошибочного решения, что может привести к тяжелым авариям и дорогостоящему ремонту. Примеров подобных инцидентов в практике эксплуатации мощных ТГ достаточно.

Вместе с тем проведенные исследования показывают, что рациональное использование и целенаправленная обработка оперативной информации, поступающей от штатных систем контроля, позволяют объектив-

но оценивать техническое и, в первую очередь, тепловое состояние активных элементов машины, определять их остаточный ресурс и по реальному состоянию планировать проведение ремонтно-восстановительных работ.

Это можно рассматривать как первый этап перехода к прогрессивной технологии обслуживания и ремонта электротехнического оборудования энергоблоков электростанций по его реальному техническому состоянию, вместо применяемой сейчас технологии планово-предупредительных ремонтов, когда обслуживание оборудования проводится по временному графику – по наработке.

Современная методика оценки теплового состояния ТГ и его систем, основана на целенаправленной обработке оперативной информации, поступающей от штатных средств контроля машины, которая позволяет, [5]:

- выявлять термометры сопротивления штатной системы термоконтроля ТГ, показания которых, по тем или иным причинам (повреждение термометра, каналов связи и пр.), являются недостоверными, требующими замены или ремонта;
- оценивать качество работы системы охлаждения ТГ: газоохладителей, теплообменников дистиллята, системы газового охлаждения в целом;
- оценивать тепловое состояние обмотки статора ТГ;
- выявлять термические дефекты обмотки статора ТГ;
- оценивать тепловое состояние сердечника статора ТГ;
- оценивать тепловое состояние обмотки ротора ТГ;
- проверять качество работы воздухоохладителей системы охлаждения.

Периодическая оценка эксплуатационного состояния ТГ не заменяет функции штатных систем контроля, а дополняет последние информацией диагностического характера. Эксплуатационная оценка технического состояния ТГ выполняется по результатам анализа диагностических параметров и заключается в сравнении текущих значений последних с их исходными (базовыми) значениями, полученными на заведомо исправной машине при пусконаладочных испытаниях или сразу после последнего капитального ремонта. Сравнение проводится с учетом принятых нормативов на допустимые различия текущих и исходных значений.

В качестве диагностических приняты значения параметров математических моделей, учитывающих реальную конструкцию элементов и узлов машины, характер протекания в них теплообменных процессов и описывающих показания термометров штатной системы термоконтроля ТГ в зависимости от режима нагружения машины, а также температур хладагентов – водорода и дистиллята, – в пределах контролируемой зоны:

$$\Theta_i = f(U, I, \theta_r, \theta_d), ^\circ\text{C} \quad (1)$$

где  $\Theta_i$ ,  $^\circ\text{C}$  – температура, зафиксированная термометром сопротивления в контролируемой зоне;  $U$ ,  $I$  и  $I$ ,  $A$  – параметры режима нагружения ТГ;  $\theta_r$ ,  $\theta_d$ ,  $^\circ\text{C}$  – температура водорода и дистиллята в контролируемой зоне.

Если же тепловые потери в узле отсутствуют (газоохладители, теплообменники дистиллята), то математическая модель представляет собой зависимость между соответствующими температурами хладагентов.

Рассмотрим модель для термометров сопротивления, контролирующих температуру стержней об-

мотки статора и расположенных между стержнями, представляет собой регрессионную зависимость вида

$$\Theta_i = A_1 I_2 + A_2 \theta_r + A_3 \theta_d, ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

а для газоохладителя ТГ соответственно

$$\Theta_{\text{ДГ}} - \Theta_{\text{ХГ}} = B(\Theta_{\text{ТВГ}} - \Theta_{\text{ХВГ}}), \quad (3)$$

где  $\Theta_{\text{ДГ}}$ ,  $\Theta_{\text{ХГ}}$  – температура водорода до и после газоохладителя;  $\Theta_{\text{ТВГ}}$ ,  $\Theta_{\text{ХВГ}}$  – температура охлаждающей воды (дистиллята) на выводе и на входе газоохладителя, соответственно.

Аналогично модель для термометров сопротивления, расположенных на дне паза, описанная выражением (2), дополняется составляющей, учитывающей наличие контакта со сталью ( $A_i U^2$ ), а для теплообменника дистиллята имеет вид (3) и связывает температуры дистиллята на входе и выходе и температуру охлаждающей воды. При этом принимается, что тепловые потери в меди обмотки пропорциональны квадрату тока статора, а потери в стали пакетов сердечника – квадрату напряжения на зажимах обмотки.

Коэффициенты математических моделей  $A_i$  и  $B_i$ , описанных в (2) и (3), отражают характер и интенсивность протекания теплообменных процессов в контролируемой зоне и являются диагностическими параметрами, анализ изменения которых позволяет выявить возникающие нарушения и дефекты, проследить темп их развития. Значения этих коэффициентов определяются методами регрессионного анализа по значениям режимных параметров и показаниям штатной системы термоконтроля ТГ, зафиксированным в нескольких (не меньше четырех), установившихся по нагреву, режимах нагрузления машины, отличающихся, как параметрами нагрузки, так и температурами хладагентов. Количество режимов связано с максимальным количеством членов регрессионных зависимостей, моделирующих показания термометров штатной системы термоконтроля. В данном случае их должно быть 6–7 в диапазоне нагрузки 60–100 % от номинальной с разбросом температур хладагентов в диапазоне  $\pm 10$  % от средних значений [4, 6].

Указанные диагностические параметры носят интегральный характер, и, поэтому, для их последующего определения нет необходимости в точном повторении режимов, при которых были определены их предыдущие значения. При выявлении в результате сравнения диагностических параметров признаков неисправности системы охлаждения генератора или возбудителя, а также наличия термических дефектов, для исключения ошибки, процедуру определения значений соответствующих параметров необходимо повторить. Если диагноз подтверждается, то выдается заключение о том, что контролируемый узел или система нуждаются в ревизии и ремонте, и на какие моменты необходимо обратить особое внимание.

Необходимость внеочередной оценки технического состояния ТГ, включая возбудитель, может возникать при наличии, например, следующих условий:

- эксплуатация ТГ после аномальных режимов (перегрузка по току ротора или статора, перегрев ротора или статора, работа с повышенным напряжением статора и пр.);
- ухудшение эффективности охлаждения узлов ТГ и возбудителя;
- появление признаков локальных перегревов или нарушения охлаждения отдельных элементов генератора и возбудителя;

- неизбежность эксплуатации генератора и возбудителя с отклонениями от заданных допустимых параметров эксплуатационных режимов;
- продление срока службы генератора сверх нормативного;
- разборка и сборка газоохладителей ТГ;
- разборка и сборка воздухоохладителей возбудителя;
- разборка ТГ с выводом ротора.

При наличии устойчивого изменения какого-либо диагностического параметра, производится оценка темпов его изменения и степени опасности зарегистрированного изменения для машины в целом. При достижении тревожного уровня принимается решение о необходимости проведения мероприятий по ограничению возможного отрицательного развития ситуации (то ли ограничение нагрузки, то ли интенсификация охлаждения и пр.). Достижение параметрами предельного (аварийного) уровня требует немедленной остановки машины и проведения ремонта. При этом при его приближении к предельному значению следует проводить внеочередные оценки технического состояния один раз в смену, а при наличии автоматизированных систем контроля – один раз в час (и чаще).

На сегодняшний день методика оценки технического состояния турбогенераторов адаптирована для ТГ типа ТВВ-1000-4У3 (8 энергоблоков украинских АЭС). Проводятся работы по адаптации методики для ТГ ТВВ-1000-2У3 (5 энергоблоков АЭС), ТГВ-300 (42 энергоблока ТЭС), ТГВ-200 (34 энергоблока), ТГВ-200М (5 энергоблоков). Апробация и освоение новых технологий позволит перейти к сооружению АЭС с реакторными установками такого типа, которые будут иметь высокие технико-экономические показатели.

Для обеспечения надежной, маневренной и экономичной работы энергоблоков большой мощности, особенно на АЭС, необходимо контролировать и поддерживать в довольно узких пределах с требуемой точностью тысячи технологических параметров, осуществлять воздействие на сотни регулирующих и запорных органов и механизмов, предусматривать большое количество различных технологических защит, т.е. принимать, перерабатывать и использовать большие объемы разнообразной информации. Причем эти задачи должны решаться при различных режимах работы оборудования, значительных внешних возмущениях, вибрациях и изменениях характеристик электродвигателей в процессе эксплуатации.

На АЭС с реакторами ВВЭР применяют несколько программ регулирования мощности ЭД при постоянном расходе теплоносителя. Эти программы имеют свои преимущества и недостатки. Одним из основных недостатков применяемых программ регулирования является значительная амплитуда колебаний основных параметров (температуры и давления) энергоблока при переменных режимах работы. Эти колебания могут приводить к малоцикловой усталости металла ЭД, уменьшая, тем самым, надежность и долговечность АЭС. Один из способов исключения этого недостатка – регулирование расхода теплоносителя через реактор при переменных режимах. Изменение числа находящихся в работе петель, при изменении нагрузки блока, позволяет уменьшить необходимый диапазон изменения давления во втором контуре и увеличить пределы регулирования мощности реактора, что обеспечивается надежной рабо-

той электродвигателей.

Известно, что для оборудования первого контура (ПК) энергоблока более благоприятна программа регулирования с постоянной средней температурой в ПК ( $T_{cp} = \text{const}$ ), а для оборудования 2-го контура (ВК) – программы регулирования с постоянным давлением ( $p_2 = \text{const}$ ). В связи с этим заслуживает внимания рассмотрение возможностей удержания постоянными как можно большего числа параметров. Поскольку изменения температуры приводят к процессам старения, желательно температуры в ПК и ВК поддерживать постоянными при изменении мощности блока. Таким образом, можно исследовать изменение расхода теплоносителя в ПК при изменении мощности блока.

В стационарном режиме тепловую мощность блока  $q$ , в о.е. можно определить:

$$q = (f_0 / f(t_1, t_4, \pi_2)) \cdot (a_1 \cdot t_1 - a_4 \cdot t_4) \cdot u(g, q) \quad (4)$$

(баланс мощностей между электродвигателями первого и второго контуров)

Для привода механизмов собственных нужд (с.н.) АЭС используются, в основном, короткозамкнутые АД мощностью от 200 до 8000 кВт с напряжением 6 кВ. Для ЭД меньшей мощности применяют напряжение 0,4 кВ. Синхронные двигатели (СД) мощностью до 3000 кВт применяют сейчас в основном на ТЭС для привода мельниц, в будущем ставится задача возможности применения СД одиночной мощностью до 20 МВт на АЭС для привода ГЦН. Применение СД становится технически и экономически целесообразным при больших мощностях привода, у них выше КПД, чем у АД, они способны генерировать или потреблять реактивную мощность, влияя, таким образом, на потери в сетях с.н. На режимы работы СД меньше оказывает влияние отклонение питающего напряжения, т.к. электромагнитный момент СД пропорционален величине приложенного напряжения (у АД электромагнитный момент пропорционален  $U^2$ ). ЭД для АЭС выпускаются 2-х типов: 1) для привода установок, расположенных под защитной оболочкой реакторного отделения АЭС (4АС80А5), 2) для привода оборудования, расположенного в "чистых" помещениях и "грязных" боксах АЭС – АИР 80А3, АИР90А3. Двигатели изготавливаются в исполнении ИМ3081 по ГОСТ 2470-79, полностью в чугунной оболочке, без вентиляторов самообдува, герметичные. ЭД соответствуют 1-й категории сейсмостойкости для районов с интенсивностью землетрясения 9 баллов, с сейсмическим воздействием с ускорением 2 в диапазоне от 2,5 до 50 Гц. Средний ресурс эксплуатации – не менее 20 000 часов.

Для ЭД электроприводов технологических циклов систем охлаждения АЭС необходимо знать время пуска оборудования и температуру их максимального нагрева [7].

Для определения времени пуска ЭД установим требование: необходимо, чтобы в момент пуска ( $\omega = 0$ ) выполнялось условие:

$$M_o > M_c,$$

где  $M_o$  – момент, развиваемый двигателем, (момент на валу), Н·м;  $M_c$  – статический момент, Н·м.

Разность развивающего двигателем момента  $M_o$  и момента  $M_c$  определяет динамический (избыточный) момент, от значения которого зависит время повышения частоты вращения двигателя от начальной  $\omega_1$  до конечной  $\omega_2$  угловой частоты вращения – время разгона:

$$M_{изб} = M_3 - M_c.$$

Время пуска агрегата можно определить из уравнения движения ротора:

$$M_3 - M_c = T_j(d\omega/dt). \quad (5)$$

Откуда

$$\begin{aligned} t_n &= T_j \cdot \int \frac{d\omega}{\omega_1 (M_3 - M_C)} \approx \\ &\approx T_j \left( \frac{\Delta\omega_1}{M_{изб.ср.1}} + \frac{\Delta\omega_2}{M_{изб.ср.2}} + \dots + \frac{\Delta\omega_n}{M_{изб.ср.н}} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $T_j$  – механическая постоянная времени агрегата, с;  $\Delta\omega_1, \dots, \Delta\omega_n$  – участки приращения частоты вращения, в пределах которых средний динамический момент можно считать постоянным.

Для оценки теплового состояния приводных двигателей электрооборудования АЭС (приводов насосов охлаждения реакторной зоны), рассчитаем температуру пакета сердечника статора. Данные к расчету:

1) Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов, используемых в электрических машинах,  $\lambda$ , Вт/(м·°C):

- сталь листовая электротехническая: вдоль слоя  $\lambda = 30$ ; поперек слоя  $\lambda = 1,0$ ;
- корпусная изоляция  $\lambda = 0,16$ ;
- изоляция элементарных проводников  $\lambda = 0,1$ ;
- пазового клина  $\lambda = 0,19$ .

2) Коэффициенты теплоотдачи в спокойном состоянии –  $a_0$ , Вт/(м<sup>2</sup> °C):

- с поверхности зубца в воздушный зазор  $a_0 = 6,7$ ;
- с поверхности спинки сердечника  $a_0 = 16,7$ ;
- с поверхности клина  $a_0 = 13,3$ ;
- в радиальном канале с поверхности стали  $a_0 = 14,2$ ;
- в радиальном канале с поверхности стержня  $a_0 = 16,7$ .

Рассчитаем нагрев теплоносителя (воздуха) в каналах сердечника статора. Температура на входе в радиальный канал складывается из температуры на входе в машину плюс подогрев в воздушном зазоре. Тепловой поток, отдаваемый сердечником в воздушный зазор

$$Q_{вз} = \frac{\theta_c - \theta_0}{R_4} + \frac{\theta_m - \theta_0}{R_3} = \frac{51 - 40}{2,1} + \frac{60 - 40}{2,5} = 13,2 \text{ Вт}.$$

На рис. 2 приведена эквивалентная тепловая схема (ЭТС) пакета сердечника статора.

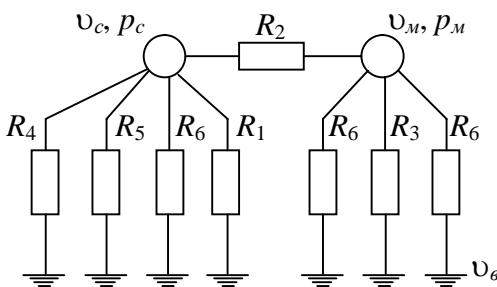


Рис. 2. Эквивалентная тепловая схема пакета сердечника статора

Нагрев воздуха в воздушном зазоре машины на длине одного пакета

$$\Delta\theta_{вз} = \frac{Q_{вз} \cdot Z_1}{C_p \cdot Q_B} = \frac{13,2 \cdot 60}{1020 \cdot 0,085} = 9,1^\circ\text{C},$$

где  $Z_1 = 60$  – число зубцовых делений в сердечнике;  $C_p = 1020 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$  – теплоемкость воздуха при  $t = 40^\circ\text{C}$ ,  $Q_B = 0,085 \text{ м}^3/\text{с}$  – расход охлаждающего воздуха на 1 радиальный канал.

Температура воздуха на входе в радиальный канал

$$\theta_{вх} = \theta_0 + \Delta\theta_{вз} = 40 + 13,2 = 53,2^\circ\text{C}.$$

Тепловой поток, отдаваемый пакетом сердечника в радиальный вентиляционный канал,

$$Q_{вк} = \frac{2(\theta_c - \theta_b)}{R_5} = \frac{2(51 - 40)}{2,87} = 7,67 \text{ Вт}.$$

Подогрев воздуха в воздушном зазоре машины на длине 1 пакета

$$\Delta\theta_{вк} = \frac{Q_{вк} \cdot Z_1}{C_p \cdot Q_b} = \frac{7,67 \cdot 60}{1020 \cdot 0,085} = 5,3^\circ\text{C},$$

где  $C_p = 1020 \text{ Дж}/\text{кг}$ ,  $^\circ\text{C}$  – теплоемкость воздуха при  $t = \theta_{вх} = 53,2^\circ\text{C}$ .

Температура воздуха на выходе из радиального канала

$$\theta_k = \theta_{вх} + \Delta\theta_{вк} = 53,2 + 5,3 = 58,5^\circ\text{C}.$$

Температура воздуха после охлаждения сердечника. Тепловой поток, отдаваемый пакетом с наружной поверхности сердечника,

$$Q_{пп} = p_{мп} + p_{сп} - Q_{вз} - Q_{вк} = 16,67 + 26,67 - 13,2 - 7,67 = 22,47 \text{ Вт}.$$

Подогрев воздуха на наружной поверхности сердечника

$$\Delta\theta_{пп} = \frac{Q_{пп} \cdot Z_1}{C_p \cdot Q_B} = \frac{22,47 \cdot 60}{1020 \cdot 0,085} = 15,6^\circ\text{C}.$$

Температура воздуха после охлаждения сердечника

$$\theta_{впп} = \theta_k + \Delta\theta_{пп} = 58,5 + 15,6 = 74^\circ\text{C}.$$

Определим температуру обмотки и сердечника с учетом подогрева воздуха.

Средняя величина подогрева воздуха при охлаждении пакета сердечника

$$\Delta\theta_{ср} = (\theta_{впп} + \theta_0)/2 - \theta_0 = (74 + 40)/2 - 40 = 17^\circ\text{C}.$$

Уточненное значение температуры сердечника

$$\theta_{ср}' = \theta_c + \Delta\theta_{ср} = 51 + 17 = 68^\circ\text{C}.$$

Уточненное значение температуры обмотки

$$\theta_M' = \theta_M + \Delta\theta_{ср} = 60 + 17 = 77^\circ\text{C}.$$

Согласно паспортным данным, класс нагревостойкости изоляции планируемых к установке двигателей F, т.е. допустимые превышения температуры нагрева изоляции обмоток равен 105 °C, (абсолютный нагрев 155 °C). Согласно проведенным расчетами можно сделать вывод, что ни один из узлов двигателей не нагревается выше допустимых значений даже для класса B. Т.о., для установленного электрооборудования на АЭС выполняется требование "service-factor", что обеспечивает дополнительный запас по надежности.

При полном прекращении питания вращающий момент АД уменьшается до нуля и агрегат снижает скорость, расходя запасенную кинетическую энергию на преодоление момента сопротивления механизма. В случае КЗ на шинах, от которых получает питание ЭД, напряжение на его зажимах понижается

до нуля и торможение агрегата с АД происходит также, как и при полном прекращении питания. При кратком замыкании в удаленной точке сети на зажимах АД сохраняется некоторое остаточное напряжение, и выбег агрегата происходит медленнее по сравнению с его выбегом при полном прекращении питания.

При одновременном пуске или самозапуске нескольких агрегатов пусковые токи ЭД складываются, увеличивая снижение напряжения в сети. Для короткозамкнутых АД и СД, имеющих пусковую короткозамкнутую обмотку, самозапуск не представляет опасности. Широкое применение АВР на электростанциях показывает, что при перерывах питания до нескольких секунд каких-либо неполадок в работе ЭД или их механизмов не происходит.

В случае невозможности обеспечить самозапуск всех ЭД, в первую очередь нужно обеспечить самозапуск особо ответственных двигателей. При этом может потребоваться отключение части менее ответственных механизмов, чтобы повысить напряжение при самозапуске. Отключать ЭД следует с помощью защиты от минимального напряжения с выдержкой времени не менее 0,5 сек. Чем короче перерыв питания, тем легче самозапуск. Неответственные ЭД с тяжелыми условиями пуска отключаются защитой при потере питания или снижении напряжения на секции на 30 % номинального продолжительностью более 1÷2 с.

## ВЫВОДЫ

1. Надежность работы ЭД технологических процессов блока АЭС, как асинхронных, так и синхронных, в первую очередь определяется их температурными режимами, т.е. уровнем нагрева и выбранной системой охлаждения. Чем ниже температура нагрева изоляции, тем выше надежность работы ЭД. Рентабельно использование теплового запаса для изоляции на класс нагревостойкости (*service-factor*).

2. Нагрев обмоток ротора и статора за время пуска двигателя под нагрузкой зависит также от напряжения, при котором производится пуск, причем пуск при пониженном напряжении через автотрансформаторы или пусковые реакторы, приводит к большему перегреву обмоток по сравнению с прямым пуском. Это объясняется тем, что при пуске двигателя при пониженном напряжении пусковой ток снижается, но одновременно возрастает и время разгона.

3. Прогрессивной технологией обслуживания и ремонта электротехнического оборудования энергоблоков АЭС является обслуживание оборудования по временному графику - по наработке и его реальному техническому состоянию, вместо применяемой сейчас технологии планово-предупредительных ремонтов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая безопасность. Концептуальные основы, принципы и пути обеспечения. Аналитический материал. / Под ред. А.И. Шевцова. ДФ. НИСИ, Днепропетровск – 1998.
2. Шевченко В.В. Системный подход к вопросам оценки технического состояния электрооборудования энергосистем Украины // Электрика (Россия). – № 1. – 2013. – С. 6-11.
3. Махова В.А., Преображенская Л.Б., Кудинов В.В. Основные задачи и перспективы развития ядерной энергетики в XXI веке // Энергетика за рубежом. – 2002. – № 5. – С. 3-21.
4. Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Минко А.Н. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов. – Харьков: Монограф СПДФД Частышев А.В., 2012. – 248 с.
5. Шевченко В.В. Основные задачи, проблемы и направления развития отечественного турбогенераторостроения // Енергетика та електрифікація. – 2012. – № 10. – С. 33-39.
6. Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Требования к атомным станциям XXI в. // Атомная энергия. – 2000. – Т. 88. – Вып. 1. – С. 3-14.
7. Шевченко В.В. Пути повышения мощности турбогенераторов при проведении работ по их реабилитации // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Харківський університет повітряних сил. – Харків, 2012. – Вип. 7(105). – С. 152-155.

**Bibliography (transliterated):** 1. 'Energeticheskaya bezopasnost'. Konceptual'nye osnovy, principy i puti obespecheniya. Analiticheskij material. / Pod red. A.I. Shevcova. DF. NISI, Dnepropetrovsk - 1998. 2. Shevchenko V.V. Sistemnyj podhod k voprosam ocenki tehnicheskogo sostoyaniya 'elektrooborudovaniya 'energosistem Ukraine // 'Elektrika (Rossiya). - № 1. - 2013. - S. 6-11. 3. Mahova V.A., Preobrazhenskaya L.B., Kudinov V.V. Osnovnye zadachi i perspektivy razvitiya yadernoj 'energetiki v XXI veke // 'Energetika za rubezhom. - 2002. - № 5. - S. 3-21. 4. Kuz'min V.V., Shevchenko V.V., Minko A.N. Optimizaciya massogabaritnyh parametrov neaktivnyh chastej turbogeneratorov. - Harkov: Monograf SPDFD Chastyshhev A.V., 2012. - 248 s. 5. Shevchenko V.V. Osnovnye zadachi, problemy i napravleniya razvitiya otechestvennogo turbogeneratorostroeniya // Energetika ta elektrifikaciya. - 2012. - № 10. - S. 33-39. 6. Alekseev P.N., Gagarinskij A.Yu., Ponomarev-Stepnoj N.N. i dr. Trebovaniya k atomnym stanciyam XXI v. // Atomnaya 'energiya. - 2000. - T. 88. - Vyp. 1. - S. 3-14. 7. Shevchenko V.V. Puti povysheniya moschnosti turbogeneratorov pri provedenii rabot po ih reabilitacii // Sistemi obrabki informacii. Zbirnik naukovih prac'. Harkiv'skij universitet povitryanih sil. - Harkiv, 2012. - Vip. 7(105). - S. 152-155.

Поступила 30.04.2013

Шевченко Валентина Владимировна, к.т.н., доц.  
Павленко Татьяна Павловна, д.т.н., проф.  
кафедра "Электрические машины"  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076844, e-mail: zurbagan@mail.ru

Shevchenko V.V., Pavlenko T.P.

## Features of electric motor choice for nuclear power plant technological objects.

Nuclear power plants remain the basic power generating enterprises for Ukraine. Execution of works on their reliability control and operating conditions optimization is therefore of current importance. Trouble-free nuclear power plant operation is a vital technical, economical, and ecological problem, a solution to which is largely specified by reliable operation of electric equipment, namely, electric motors of nuclear power plant technological process drives.

**Key words – nuclear power plant, operation optimization, reliability, electric equipment, electric motors.**

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МИКРОДИПОЛЬНОЙ МОДЕЛИ ШАРОВОЙ МОЛНИИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ

*Запропонована нова електродинамічна модель кульової блискавки (КБ), що містить внутрішнє високотемпературне торoidalне енергетичне ядро і зовнішню електронейтральну високополяризовану водяну оболонку. Енергетичне ядро такої КБ утворює електронні і протонні мікротори зі своїми елементарними спірально-кільцевими струмами, які направлені в протилежні сторони. Спірально-кільцеві електронні струми провідності ядра КБ створюють навколо нього сильне імпульсне азимутальне магнітне поле і надсильне вихрове радіальне електричне поле.*

*Предложена новая электродинамическая модель шаровой молнии (ШМ), содержащая внутреннее высокотемпературное торoidalное энергетическое ядро и внешнюю электронейтральную высокополяризованную водяную оболочку. Энергетическое ядро такой ШМ образуют электронные и протонные микроторы со своими элементарными спирально-кольцевыми токами, направленными в противоположные стороны. Спирально-кольцевые электронные токи проводимости ядра ШМ создают вокруг него сильное импульсное азимутальное магнитное поле и сверхсильное вихревое радиальное электрическое поле.*

### ВВЕДЕНИЕ

В свое время в [1-3] автором была предложена и в первом приближении математически описана микродипольная модель шаровой молнии (ШМ), образующейся в воздушной атмосфере и содержащей в своем центре внутреннее сплошное отрицательно заряженное сферообразное электронное ядро радиусом  $r_{0e}$  и внешнюю полуэлектронейтральную водяную оболочку радиусом  $r_0$  с многочисленными сферическими слоями радиально ориентированных электрических диполей высокополяризованных микрочастиц-сфериодов, состоящих из полярных округлых молекул воды радиусом  $r_m \approx 1,925 \cdot 10^{-10}$  м, имеющих собственный электрический дипольный момент  $p_m \approx 6,2 \cdot 10^{-30}$  Кл·м [4]. Водяная оболочка в микродипольной (по сути кластерной) модели ШМ как изолирует ее заряженное высококонцентрированное энергетическое электронное ядро от окружающей среды и тем самым увеличивает время его “жизни”, так и аккумулирует электрическую энергию в вакуумных нанозазорах величиной до  $2r_m$  между своими микродиполями-сфериодами [1-3]. Одним из основных недостатков этой модели ШМ явилось то, что в ее основу было положено лишь электростатическое взаимодействие связанных зарядов обеих полярностей с поверхностной плотностью  $\sigma_m \approx 5e_0/(\pi r_m^2)$ , где  $e_0 = -1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – электрический заряд электрона, электрических диполей микрочастиц-сфериодов воды оболочки ШМ друг с другом и с неподвижными свободными нерелятивистскими электронами сферического ядра рассматриваемого природного электрофизического феномена. Учитывая, что в соответствии с опытными данными международных наблюдений природной ШМ [5] предвестником этого атмосферного явления обычно является линейная молния (ЛМ), быстро протекающая в земной атмосфере (при длительности ее длинных сильноточных искровых разрядов в течение порядка одной секунды [6]), то более вероятным процессом образования и существования в воздушной атмосфере ШМ должен служить не электростатический, а электродинамический процесс, сопровождающийся ее достаточно быстрым возникновением, относительно медленным протеканием и взрывообразным или бесшумным распадом ее внутреннего энергетического ядра и внешней оболочки. В этой связи автору представляется целесообразным усовершенствовать ранее разработанную им микродипольную модель ШМ, внеся в нее элементы классической электродинамики, характерные для природной ШМ.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ШМ

Рассмотрим локальную область воздушной атмосферы, в которой может протекать либо природная ЛМ с ее сильноточным грозовым электрическим разрядом, либо происходить дуговой электрический разряд, обусловленный как случайными аварийными режимами в электрических сетях переменного напряжения с протеканием тока короткого замыкания (КЗ), так и нормальными режимами работы высоковольтных сильноточных электроустановок различного технологического назначения. Пусть атмосферные условия удовлетворяют нормальнym (температура воздушной среды равна  $T_0 \approx 0$  °C, а ее давление составляет  $p_0 \approx 1,013 \cdot 10^5$  Па [7]) и в этой воздушной области присутствуют многочисленные полярные молекулы и микрочастицы воды. Принимаем, что из-за воздействия внешнего электрического поля с напряженностью  $E_B$  (например, от сильноточного канала ЛМ или дугового разряда в цепи электроустановки) наступает дополнительная электронная и ориентационная поляризация полярных микросфер воды и в них возникают индуцированные электрические дипольные моменты  $p_e$ , а молекулы и микрочастицы воды принимают форму, близкую к вытянутым сфериодам [1,7]. Считаем, что закругленные наименьшим радиусом  $r_m$  торцы этих микрочастиц-сфериодов воды, состоящих из полярных молекул влаги, на своих поверхностях содержат поляризационные некомпенсированные связанные электрические заряды противоположной полярности с поверхностной плотностью  $\sigma_e$ , примерно равной поверхностной плотности  $\sigma_m$  зарядов для полярных молекул воды радиусом  $r_m$ . Допускаем, что молекулы и микрочастицы-сфериоды воды согласно теории ориентационной поляризации полярных диэлектриков во внешнем электрическом поле с напряженностью  $E_B$  будут всегда направлены по этому полю [1, 4, 7]. В этом случае векторы их электрических дипольных моментов  $p_m$ ,  $p_e$  и напряженности  $E_B$  внешнего электрического поля будут совпадать по направлению. Используем известное положение, лежащее в основе явления диэлектрофореза в неоднородном электрическом поле [8], согласно которому на полярную молекулу воды и соответственно на микрочастицу-сфериод влаги в подобном поле будет действовать электрическая сила, втягивающая такую молекулу и указанную микрочастицу в зону с более сильным полем [4]. С учетом неоднородного характера радиального

распределения напряженности  $E_B$  электрического поля, вызванной в воздушной атмосфере сильноточным цилиндрическим каналом ЛМ или дугового разряда с током КЗ, принимаем, что в рассматриваемой атмосферной области могут возникать физические условия, приводящие к радиальному послойному формированию вокруг вероятного энергетического ядра ШМ, содержащего избыточные электронные токи, ее микродипольной водяной оболочки [1, 8]. Как и в [1-3] полагаем, что расстояние между торцами диполей микрочастиц-сфериоидов влаги соседних слоев водяной оболочки, а также между микродиполями этой оболочки и энергетическим ядром ШМ составляет порядка габаритных размеров молекулы воды  $2r_m$ . Для описания в дальнейшем энергетического ядра ШМ воспользуемся известным в физике плазмы понятием плазмоида, представляющего собой сравнительно небольшой объем овальной формы, заполненный высокотемпературной плазмой, удерживаемой собственным магнитным полем [9, 10]. Пусть данное магнитное поле плазмоида, находящегося в воздушной атмосфере с внешним по отношению к нему давлением  $p_0$ , создается электрическим током проводимости, протекающим в его высоконизированной плазме. Считаем, что в рассматриваемом плазмоиде – потенциальному энергетическому ядре ШМ из-за сильного внешнего электромагнитного влияния (например, из-за действия сильного азимутального магнитного поля от сильноточного цилиндрического канала ЛМ или дугового разряда с током КЗ) могут создаваться физические условия, обеспечивающие как постранныстное разделение его отрицательно и положительно заряженных частиц, так и их практически бесстолкновительный характер направленного в противоположные стороны кругового движения. Требуется с учетом принятых допущений разработать усовершенствованную микродипольную модель ШМ с внешней поляризованной электронейтральной водяной оболочкой, внутреннее высокотемпературное энергетическое ядро (плазмоид) которой может представлять собой замкнутую систему круговым образом и противоположно движущихся отрицательных и положительных электрических зарядов.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМОИДА ШМ

Исследуем электродинамические процессы, протекающие в воздушной атмосфере вблизи изгиба сильноточного канала разряда ЛМ [11] или дугового разряда в силовой цепи электроустановки. Изгиб канала данных разрядов для нас интересен тем, что в его зоне в слабоионизированной плазме (при степени ее ионизации  $m \approx 10^{-6}$  и концентрации в ней свободных электронов  $n_e \approx 7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$  [12]), окружающей сильноточный канал воздушного разряда, может происходить процесс формирования замкнутого кольцевого тока проводимости, способного стать в будущем энергетическим ядром ШМ. Остановимся далее на основных электрофизических особенностях при возможном создании такого электрического тока в слабоионизированной двухкомпонентной плазме, находящейся вблизи изгиба сильноточного канала электрического разряда с продольным током  $i_p$  (рис. 1).

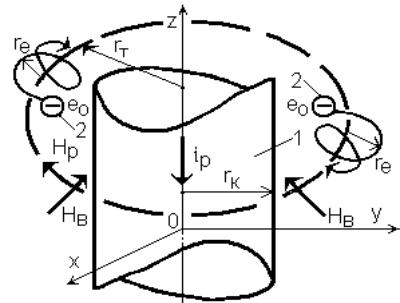


Рис. 1. Схематическое изображение цилиндрического высокоионизированного канала сильноточного грозового или дугового электрического разряда в воздушной атмосфере и движущихся по циклоидам вблизи его изгиба вокруг круговых линий магнитной индукции плазменного канала свободных электронов  
(1 – разрядный канал; 2 – электроны)

**2.1. Образование электронных и протонных колец вблизи канала разряда.** Следует отметить, что на процесс возможного создания подобных проводящих колец в слабоионизированной плазме вокруг канала разряда ЛМ ранее указывалось в [11] при описании ее автором расчетной модели ШМ, образуемой при развитии в воздушной атмосфере ЛМ и содержащей в центре вакуумную сферическую полость, возникающую при детонации водородно-кислородной смеси и окруженную положительно заряженным энергетическим ядром, состоящим из протонных колец, и внешней поляризованной водяной оболочкой. Учитывая поступающую от рассматриваемого цилиндрического канала электрического разряда в воздушную среду энергию интенсивного излучения (прежде всего, ультрафиолетового [11, 12]) и возникающий в ней (этой газовой среде) резко неоднородный радиальный градиент температуры, появляющиеся в воздухе вблизи канала свободные электроны и положительно заряженные ионы будут характеризоваться наличием у них приводящих радиальных скоростей  $v_{er}$  и  $v_{pr}$  соответственно. Движение таких частиц в азимутальном магнитном поле разрядного канала с продольным импульсным током  $i_p$  и круговой напряженностью  $H_p$  (см. рис. 1), на которые воздействуют соответствующие центростремительные силы Лоренца  $F_{el}=e_0\mu_0 v_{er} H_p$  и  $F_{pl}=q_p\mu_0 v_{pr} H_p$ , где  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная, а  $q_p$  – величина заряда иона, согласно законам классической механики и электродинамики будут описываться следующими уравнениями движения [13]:

- для свободных электронов

$$m_e \frac{dv_{er}}{dt} = e_0 \mu_0 v_{er} H_p; \quad (1)$$

- для ионов

$$m_p \frac{dv_{pr}}{dt} = q_p \mu_0 v_{pr} H_p, \quad (2)$$

где  $m_e \approx 9,108 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  [7],  $m_p$  – соответственно массы покоя движущихся в магнитном поле электронов и ионов.

Для наглядности и простоты анализа в дальнейшем ограничимся рассмотрением в приканальной зоне наиболее легких однозарядных ионов – протонов ( $q_p=|e_0|=1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ;  $m_p \approx 1836 \cdot m_e$  [7]), образующихся вблизи разрядного канала из атомов водорода при их ионизации. В соответствии с (1) и (2) электроны и про-

тоны под действием сил Лоренца  $F_{el}$  и  $F_{pL}$  перпендикулярных их скоростям  $v_{er}$  и  $v_{pr}$ , будут осуществлять круговое вращение вокруг замкнутых линий напряженности  $H_p$  внешнего азимутального магнитного поля. Причем, это движение рассматриваемых частиц разноименного заряда по окружностям радиусами  $r_e$  и  $r_p$  будет происходить в противоположных направлениях, а плоскости данных окружностей будут перпендикулярны линиям магнитной индукции внешнего поля, генерируемого током  $i_p$  разрядного канала. Радиусы  $r_e$  и  $r_p$ , обычно называемые ларморовскими радиусами вращения заряженных частиц в магнитном поле (данные радиусы так были названы в честь впервые введших эти понятия в 1895 году известного английского физико-теоретика Джозефа Лармора (1857-1942 гг.)) [12, 13], с учетом (1) и (2) определяются из следующих математических соотношений:

- для свободных электронов

$$\frac{m_e v_{er}^2}{r_e} = e_0 \mu_0 v_{er} H_p; \quad (3)$$

- для протонов

$$\frac{m_p v_{pr}^2}{r_p} = e_0 \mu_0 v_{pr} H_p. \quad (4)$$

Тогда из (3) и (4) для ларморовских радиусов  $r_e$  и  $r_p$  вращения свободных электронов и протонов в азимутальном магнитном поле сильноточного канала грозового (дугового) электрического разряда в воздушной атмосфере получаем:

$$r_e = \frac{m_e v_{er}}{e_0 \mu_0 H_p}; \quad (5)$$

$$r_p = \frac{m_p v_{pr}}{e_0 \mu_0 H_p}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) видно, что для нахождения численных значений радиусов  $r_e$  и  $r_p$  необходимо знать величины скоростей электронов  $v_{er}$  и протонов  $v_{pr}$  в воздушной среде, а также уровень напряженности  $H_p$  магнитного поля вблизи разрядного канала радиусом  $r_k$ . Соотношение между радиусами протонных и электронных колец в приканальной зоне согласно (5) и (6) оказывается равным  $r_p/r_e = (m_p \cdot v_{pr})/(m_e \cdot v_{er})$ . Считая температуры электронов  $T_e$  и протонов  $T_p$  примерно равными в плазме, прилегающей снаружи к разрядному каналу, осуществим приближенную оценку величин скоростей  $v_{er}$  и  $v_{pr}$ . Для этого вначале по известным амплитудно-временным параметрам (АВП) разрядного тока  $i_p$  в канале найдем максимальную электронную температуру  $T_{me}$  в этом канале и вблизи него. С этой целью используем приближенное расчетное соотношение (6) из [14] для  $T_{me}$ , согласно которому для искомой величины электронной температуры в сильноточном канале воздушного искрового разряда можно записать следующее выражение:

$$T_{me} = 5,83 \cdot 4 \sqrt{\frac{(I_{mp})^{1/3}}{\sigma_c t_{mp}}}, \quad (7)$$

где  $I_{mp}$ ,  $t_{mp}$  – соответственно первая амплитуда разрядного тока в плазменном канале и время ее достижения;  $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)^{-1}$  – постоянная Стефана-Больцмана [7].

Для АВП тока воздушного сильноточного разря-

да, характерного для ЛМ ( $I_{mp} \approx 200 \text{ кА}$ ;  $t_{mp} \approx 10 \text{ мкс}$  [6]), из (7) следует, что в этом случае величина  $T_{me}$  принимает численное значение, равное примерно  $18,6 \cdot 10^3 \text{ К}$  (около 1,6 эВ [13]). Для сравнения полученного по (7) расчетного численного значения для  $T_{me}$  с известными в области техники и электрофизики высоких напряжений результатами отметим, что согласно приведенным в [12] данным температура в сильноточном плазменном канале на стадии обратного искрового разряда ЛМ достигает до  $20 \cdot 10^3 \text{ К}$  при плотности свободных электронов в нем около  $n_e \approx 10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Учитывая указанные выше значения для электронной температуры  $T_{me}$  в плазменном канале разряда ЛМ, вблизи подобного токового канала для максимальной электронной температуры в окружающей его слабоионизированной плазме при определении в ней величин скоростей электронов  $v_{er}$  и протонов  $v_{pr}$  можно обоснованно принять, что ее значение составляет примерно 1 эВ (около 11600 К [13]). Тогда при  $T_{me} \approx T_{mp}$  в приближении максвелловского закона распределения скоростей частиц в плазме для численной оценки искомых скоростей теплового движения электронов  $v_{er}$  и протонов  $v_{pr}$  в плазме вокруг сильноточного разрядного канала ЛМ или дугового разряда можно воспользоваться следующими расчетными формулами:

$$v_{er} = \left( \frac{3k_B T_{me}}{m_e} \right)^{1/2}; \quad (8)$$

$$v_{pr} = \left( \frac{3k_B T_{me}}{m_p} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

где  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана [7].

Из (8) и (9) при  $T_{me} \approx 1 \text{ эВ}$  следует, что для свободных электронов средняя скорость их теплового движения в приканальной зоне может составлять примерно  $v_{er} \approx 7,26 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ , а для протонов – около  $v_{pr} \approx 1,69 \cdot 10^4 \text{ м/с}$ . Что касается уровня напряженности  $H_p$  внешнего магнитного поля в рассматриваемой плазме, то для его оценки сверху в зоне с текущим радиусом  $r_T > r_k$  (см. рис. 1) используем расчетное выражение, вытекающее из закона полного тока:

$$H_p = \frac{I_{mp}}{2\pi r_T}, \quad (10)$$

где  $r_T = r_k + \Delta r$ ;  $\Delta r \geq r_p$  – величина пространственного зазора между наружной поверхностью цилиндрического канала разряда радиусом  $r_k$  и центрами ближайших к каналу окружностей электронных и протонных колец;  $r_k \approx 0,093 \cdot (I_{mp})^{1/3} \cdot (t_{mp})^{1/2}$  – максимальный радиус сильноточного искрового канала воздушного разряда, соответствующий формуле Брагинского [15].

При прежних АВП импульсного тока грозового разряда ( $I_{mp} \approx 200 \text{ кА}$ ;  $t_{mp} \approx 10 \text{ мкс}$ ;  $r_k \approx 17,2 \text{ мм}$ ) и  $\Delta r \approx 3 \text{ мм}$  из (10) находим, что  $H_p \approx 1,57 \cdot 10^6 \text{ А/м}$  (этой напряженности в воздухе соответствует магнитная индукция  $B_p = \mu_0 H_p$ , примерно равная 1,98 Тл). Видно, что в приканальной зоне сильноточного искрового разряда ЛМ генерируется сильное импульсное азимутальное магнитное поле. В результате из (5) и (6) при  $v_{er} \approx 7,26 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ ,  $v_{pr} \approx 1,69 \cdot 10^4 \text{ м/с}$  и  $H_p \approx 1,57 \cdot 10^6 \text{ А/м}$  получаем, что вблизи разрядного канала ЛМ создаются врачающиеся во взаимно противоположных направлениях электронные и протонные кольца, имеющие соответственно ларморовские радиусы  $r_e \approx 2,1 \text{ мкм}$  и  $r_p \approx 89,8 \text{ мкм}$ . Соотношение  $r_p/r_e$  для грозового разряда

в воздушной атмосфере оказывается численно равным около 42,8. Это означает, что круговые орбиты огромного множества свободных электронов будут проходить внутри круговых протонных орбит, замыкающихся вокруг кольцевых линий напряженности  $H_p$  разрядного канала относительно далеко снаружи от "роя" быстро вращающихся нерелятивистских электронов. При этом рассматриваемые электроны и протоны на окружностях с ларморовскими радиусами  $r_e$  и  $r_p$  будут круговым образом вращаться с циклотронными частотами [12, 13], соответственно равными  $\omega_e$  и  $\omega_p$  и определяемыми с учетом (5) и (6) из следующих аналитических выражений:

$$\omega_e = \frac{v_{er}}{r_e} = \frac{e_0 \mu_0 H_p}{m_e}; \quad (11)$$

$$\omega_p = \frac{v_{pr}}{r_p} = \frac{e_0 \mu_0 H_p}{m_p}. \quad (12)$$

Из (11) и (12) следует, что для проводящих электронных и протонных колец, формирующихся в слабоионизированной плазме снаружи канала искрового (дугового) воздушного электрического разряда, выполняется соотношение  $\omega_e/\omega_p = m_p/m_e \approx 1836$ . Подставив в (11) и (12) принятое нами значение для напряженности  $H_p \approx 1,57 \cdot 10^6$  А/м, находим, что для вращающихся электронов циклотронная частота составляет около  $\omega_e \approx 3,47 \cdot 10^{11}$  Гц, а для протонов – около  $\omega_p \approx 1,89 \cdot 10^8$  Гц. Интересно отметить, что для случая развития в воздушной атмосфере ЛМ вблизи ее сильноточного канала разряда только в одном элементарном проводящем торе принятым радиусом  $r_T \approx 20,2$  мм, ограниченном снаружи протонными кольцами радиусом  $r_p \approx 89,4$  мкм, при плотности электронов  $n_e \approx 7 \cdot 10^{16}$  м<sup>-3</sup> в слабоионизированной плазме, окружающей этот канал, может содержаться до  $22,3 \cdot 10^7$  штук электронных колец радиусом  $r_e \approx 2,1$  мкм.

Таким образом, благодаря существенному различию в скоростях  $v_{er}$  и  $v_p$  теплового движения свободных электронов и протонов, их собственных массах покоя  $m_e$  и  $m_p$  и ларморовских радиусах  $r_e$  и  $r_p$  их вращения в сильном импульсном магнитном поле разрядного канала в воздушной атмосфере ЛМ в приканальной зоне происходит пространственное разделение указанных электрических зарядов в образующейся в ней (этой зоне) слабоионизированной плазме. Для многозарядных и соответственно более тяжелых положительно заряженных ионов, которые могут присутствовать в воздухе и соответственно в рассматриваемой плазме, подобное разделение электрических зарядов при прежних токовых и полевых характеристиках для разрядного высокоионизированного канала в воздушной среде будет еще более заметным и выраженным. Такое вызванное внешним азимутальным магнитным полем канала разряда пространственное разделение в исследуемой плазме электронов и, в частности, протонов, встречно вращающихся по своим отдельным кольцам с огромными циклотронными частотами  $\omega_e$  и  $\omega_p$ , создает условие для бесстолкновительного характера движения этих заряженных частиц. Причем, чем выше амплитудные значения разрядного тока  $I_{mp}$  в канале и напряженности  $H_p$  магнитного поля вокруг него, а значит и меньше согласно (5) и (6) значения ларморовских радиусов  $r_e$  и  $r_p$ , тем становится более вероятным наступление подобного режима движения указанных частиц.

**2.2. Образование спирально-кольцевого электронного тока вблизи канала разряда.** Для появления в приканальной зоне замкнутых импульсных токов проводимости, охватывающих высокоионизированный разрядный канал, необходимо возникновение вдоль образующихся в этой зоне проводящих электронных и протонных колец продольного импульсного электрического поля с замкнутыми по кругу линиями его напряженности. Такое вихревое электрическое поле во внутренних электронных и наружных протонных элементарных микроторах с главными радиусами  $r_{T\Theta}$ , состоящих из указанных электронных и протонных колец в своих поперечных радиальных сечениях с ларморовскими микрорадиусами  $r_e$  и  $r_p$ , возникает благодаря явлению электромагнитной индукции [13], вызывающему с учетом своего электрофизического микромеханизма действия [16] появление в этих пока неподвижных в плоскостях  $XY$  (см. рис. 1) с окружностями длиной  $2\pi r_{T\Theta}$  проводящих микрообразованиях соответствующих электродвижущих сил (ЭДС)  $U_e$  и  $U_p$ . Для упрощения численных оценок значений возникающих в данном случае ЭДС  $U_e \approx U_p$  воспользуемся некоторым эквивалентным электронным макротором с главным радиусом  $r_T$ , имеющим в своем поперечном радиальном круглом сечении микрорадиус  $r_{eT} \gg r_e$  (рис. 2). Появлению указанной ЭДС  $U_e$  в таком электронном макроторе радиусом  $r_T$ , содержащем множество элементарных электронных микроторов с радиусами  $r_{T\Theta}$ , как раз и содействует изгиб разрядного канала. В зоне изгиба сильноточного канала разряда ЛМ или дугового разряда в силовой электрической цепи напряженность  $H_B$  внешнего азимутального магнитного поля разрядного канала в воздушном пространстве (см. рис. 1) приобретает такое направление, при котором образуемый ею (этой напряженностью) изменяющийся во времени магнитный поток  $\Phi_B$  пересекает плоскости электронных и протонных элементарных микроторов с окружностями длиной  $2\pi r_{T\Theta}$ . В результате воздействия такого магнитного потока  $\Phi_B$  на введенный эквивалентный электронный макротор с главным радиусом  $r_T$  и радиусом  $r_{eT}$  сечения его кольца в нем будет возникать переменная ЭДС  $U_e$ , рассчитываемая по выражению [7]:

$$U_e \approx -\pi \mu_0 (r_T^2 - r_k^2 - 2r_T r_{eT}) \cdot \frac{dH_B}{dt}. \quad (13)$$

Считаем, что скорость изменения во времени  $t$  напряженности  $H_B$  соответствует производной  $dH_p/dt$ , численное значение которой при принятых нами АВП импульсного тока разряда ЛМ ( $I_{mp} \approx 200$  кА;  $t_{mp} \approx 10$  мкс;  $r_k \approx 17,2$  мм;  $H_p \approx 1,57 \cdot 10^6$  А/м) в приканальной зоне для  $r_T \approx 20,2$  мм ( $\Delta r \approx 3$  мм) может составлять примерно  $1,57 \cdot 10^{11}$  А/(м·с). Тогда из (13) при указанных исходных данных и  $r_{eT} \approx 1$  мм находим, что индуцируемая ЭДС в эквивалентном электронном макроторе радиусом  $r_T$  в зоне изгиба разрядного канала составит около  $U_e \approx -44,5$  В. Появление такой ЭДС в электронном макроторе с принятими радиусом  $r_T$  и поперечным радиальным круглым сечением радиусом  $r_{eT}$  (см. рис. 2) приведет к круговому движению его свободных электронов вдоль окружности длиной  $2\pi r_T$ . Из области физики высоких энергий и ускорительной техники известно, что индуцированное в электронном кольце микрорадиусом  $r_T$  ускоряющее напряжение величиной  $U_e$  вызовет ускорение нерелятивистских электронов указанного макротора, предварительно вращающихся по окружностям с ларморовскими мик-

порадиусами  $r_e$ , до линейных скоростей  $v_{eT}$ , определяемых из следующего соотношения [13]:

$$v_{eT} = \left( \frac{2e_0 U_e}{m_e} \right)^{1/2}. \quad (14)$$

Безусловно, что при данном ускорении свободных электронов рассматриваемого макротора должны обеспечиваться условия для их практически бесстолкновительного кругового движения. В связи с описанным выше реальным механизмом пространственного разделения электрических зарядов (на примере электронов и протонов) в слабоионизированной плазме вокруг сильноточного высокоионизированного разрядного канала, на мой взгляд, такие условия в приканальной зоне у изгиба канала могут возникать. Кроме того, этому будет также способствовать то важное обстоятельство, что вращающиеся с циклотронной частотой  $\omega_e$  по окружностям с ларморовскими радиусами  $r_e$  свободные электроны в своих элементарных микроторах с главными радиусами  $r_{T\Theta}$  снаружи от возможного проникновения в область их нахождения других частиц защищены протонными кольцами с вращающимися по их окружностям с ларморовскими радиусами  $r_p > r_e$  и с циклотронной частотой  $\omega_p < \omega_e$  многочисленными протонами. Кстати, подобное устройство вблизи изгиба канала ЛМ элементарных электронных микроторов с главными радиусами  $r_{T\Theta}$  и с круговым образом вращающимися согласно (14) с линейными скоростями  $v_{eT}$  по окружностям длиной  $2\pi r_{T\Theta}$  электронами, окруженными снаружи сильным азимутальным магнитным полем с напряженностью  $H_p$  разрядного канала и элементарными полыми протонными микроторами с подобными радиусами  $r_{T\Theta}$  и ларморовскими радиусами  $r_p$  их круглых радиальных попечерных сечений (этими полностью ионизированными своеобразными защитными тепловыми скин-слоями электронных микроторов), в соответствии с [10] будет способствовать защите высокотемпературной плазмы потенциально образующихся плазмоидов от окружающего ее холодного воздуха. Численная оценка по (14) уровня возможных линейных скоростей  $v_{eT}$  электронов в рассматриваемом макроторе радиусом  $r_T \approx 20,2$  мм, образующемся вблизи изгиба канала воздушного разряда ЛМ, показывает, что при  $|U_e| \approx 44,5$  В они при своем спирально-кольцевом (циклоидальном) движении (см. рис. 1 и 2) принимают значение около  $3,95 \cdot 10^6$  м/с. Данной скорости электронов соответствует их круговая частота вращения  $\omega_{eT} = v_{eT}/r_T$  в указанном электронном торе, равная около  $1,95 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>, и период обращения, составляющий примерно  $T_{eT} = 2\pi/\omega_{eT} \approx 32,22$  нс. Следует отметить, что после индуцирования в элементарных электронных и протонных микроторах ЭДС  $U_e \approx U_p$  из-за кругового движения во взаимно противоположных направлениях вокруг разрядного канала в плоскостях XY электронов и протонов в соответствующих элементарных микроторах с главными радиусами  $r_{T\Theta}$  и ларморовскими радиусами  $r_e$  и  $r_p$  будет происходить обжатие электронных микроторов. По-видимому, это может приводить к повышению плотности электронов  $n_e$  в них. Верхним уровнем для электронной концентрации (плотности) при этом может оказаться величина, характерная для сильноточного искрового (дугового) электрического разряда и равная примерно  $n_e \approx 7 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup> [12].

Приближенная оценка отрицательного электрического заряда  $q_{eT}$ , протекающего в принятом нами эквивалентном электронном макроторе с радиусами  $r_T$

и  $r_{eT}$ , может быть осуществлена по формуле:

$$q_{eT} \approx 2\pi^2 e_0 n_e r_T r_{eT}^2. \quad (15)$$

Из (15) при  $n_e \approx 7 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup> и выбранных геометрических параметрах электронного тора ( $r_T \approx 20,2$  мм;  $r_{eT} \approx 1$  мм) следует, что величина  $q_{eT}$  окажется равной около  $4,47 \cdot 10^{-4}$  Кл. Расчетное соотношение для приближенного определения максимального значения электронного тока проводимости  $i_{eT}$  в данном высокопроводящем торе-кольце с движущимися по циклоидам электронами примет следующий вид:

$$i_{eT} \approx \frac{q_{eT}}{T_{eT}} \approx \pi n_e r_{eT}^2 \left( \frac{2e_0^3 U_e}{m_e} \right)^{1/2}. \quad (16)$$

Из (16) при  $r_{eT} \approx 1$  мм и  $|U_e| \approx 44,5$  В получаем, что амплитудное значение тока  $i_{eT}$  в электронном макроторе составит примерно 13,87 кА. Видно, что даже при  $r_{eT} \approx 1$  мм наибольшая величина электрического тока проводимости  $i_{eT}$  в образующемся вокруг сильноточного канала воздушного разряда ЛМ в зоне его изгиба эквивалентном высокопроводящем электронном макроторе достигает значительного уровня.

Что касается линейных скоростей  $v_{pT}$  протонов, ускоряемых индуцируемой ЭДС  $U_p \approx U_e$  в указанных элементарных протонных микроторах с главным радиусом  $r_{T\Theta}$  и ларморовскими радиусами  $r_p$  вращения этих частиц, то их значения аналогично (14) определяются по следующей формуле:

$$v_{pT} = \left( \frac{2e_0 U_e}{m_p} \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Из (17) при  $|U_p| \approx |U_e| \approx 44,5$  В находим, что величины скоростей  $v_{pT}$  протонов вдоль соответствующих элементарных микроторов могут достигать максимальных значений, равных примерно  $9,23 \cdot 10^4$  м/с. Становится ясным, что для линейных скоростей протонов, ускоряемых по большому кругу тора радиусом  $r_T \approx 20,2$  мм в зоне изгиба сильноточного разрядного канала ЛМ, выполняется соотношение  $v_{eT}/v_{pT} \approx 42,8$ . Как оказывается, эта величина полностью соответствует численному значению соотношения ларморовских радиусов для протонов и электронов в сильном магнитном поле грозового разряда, приближенно равному, как было показано нами ранее, также  $r_p/r_e \approx 42,8$ . Движущимся вдоль своих полых микроторов по циклоидам протонам будет соответствовать круговая частота вращения  $\omega_{pT} = v_{pT}/r_T$ , численно составляющая около  $4,57 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>, и их период обращения, примерно равный  $T_{pT} = 2\pi/\omega_{pT} \approx 1,37$  мкс. В приближении равенства в исследуемой плазме ядра ШМ (в рассматриваемом плазмоиде) по модулю протекающих вдоль всех указанных элементарных микроторов в противоположных круговых направлениях электронного  $q_{eT} \approx 4,47 \cdot 10^{-4}$  Кл и протонного  $q_{pT}$  электрических зарядов максимальная величина тока протонов  $i_{pT} \approx q_{pT}/T_{pT}$  может составлять лишь около 0,325 кА. Видно, что для соотношения суммарных электронного и протонного спирально-кольцевых импульсных токов в зоне изгиба канала разряда ЛМ выполняется равенство  $i_{eT}/i_{pT} \approx 42,7$ . Полученное соотношение между указанными круговыми токами, охватывающими в зоне изгиба канала разряда высокопроводящий столб плазмы ЛМ, позволяет нам сделать важный для дальнейшего понимания механизма образования природной ШМ за счет атмосферного электри-

чества вывод о том, что преобладающим влиянием на протекающие электрофизические процессы в рассматриваемой локальной воздушной зоне вблизи канала разряда ЛМ будет обладать кольцевой импульсный электронный ток  $i_{et}$ . Практически влиянием кольцевого импульсного протонного тока  $i_{pt}$  на процесс формирования в этой особой зоне (в зоне зарождения плазмоида-ядра ШМ) внешнего вихревого радиального электрического поля и в последующем высокополяризованной водяной оболочки ШМ и соответственно внешних электрофизических атрибутов ШМ (свечения, потрескивания, шипения и др.) можно пренебречь. Главное предназначение протонных колец с лармировскими радиусами  $r_p$  и их элементарного спирально-кольцевого тока  $i_{pt}$  заключается в электродинамическом удержании и тепловой защите от холодного воздуха высокотемпературных электронных колец с лармировскими радиусами  $r_e$  и их элементарного спирально-кольцевого тока проводимости  $i_{et}$ . Именно такой научной позиции автора соответствует приведенная на рис. 2 упрощенная структура предлагаемой электродинамической модели ШМ, содержащей внутри центральное высокотемпературное энергетическое ядро в виде эквивалентного высокопроводного макротора радиусом  $r_T$  со спирально-кольцевым электронным током проводимости  $i_{et}$ , протекающим по данному тору-кольцу с круглым поперечным сечением радиусом  $r_{et}$ , и внешнюю окружную высокополяризованную многослойную водяную оболочку наружным радиусом  $r_0 > (r_T + r_{et})$  с множеством сферообразных слоев микродиполей-сфериодов влаги.

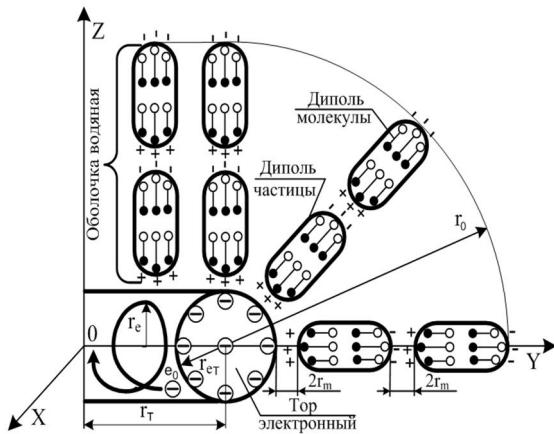


Рис. 2. Упрощенная структура предложенной электродинамической модели ШМ с центральным тором спирально-кольцевого электронного тока  $i_{et}$  и внешней поляризованной электронейтральной водяной оболочкой, состоящей из множества сферообразных слоев микродиполей-сфериодов воды (на данном рисунке показан радиальный срез лишь одной четвертой части поперечного сечения ШМ)

Численная оценка уровня напряженности  $H_{et}$  собственного азимутального импульсного магнитного поля от сформировавшегося вблизи изгиба разрядного канала ЛМ электронного тора со спирально-кольцевым током проводимости  $i_{et}$  по приближенному соотношению  $H_{et} \approx i_{et} r / (2r_T)$  показывает, что при  $i_{et} \approx 13,87$  кА и  $r_T \approx 20,2$  мм данная напряженность составляет около  $0,34 \cdot 10^6$  А/м (этой напряженности в воздухе соответствует магнитная индукция  $B_{et} \approx \mu_0 H_{et}$ , равная примерно 0,43 Тл). Вблизи самого электронного тора с указанным главным радиу-

сом  $r_T$  значения напряженности  $H_{et} \approx i_{et} r / (2\pi r_T)$  при  $r_{et} \approx 1$  мм достигают уровня около  $2,2 \cdot 10^6$  А/м, которым соответствуют значения магнитной индукции  $B_{et} \approx 2,8$  Тл. Эти расчетные данные дают основание заключить, что при ЛМ в зоне образования центрального энергетического ядра ШМ, содержащего электронный тор радиусом  $r_T \approx 20,2$  мм со спирально-кольцевым током проводимости  $i_{et} \approx 13,87$  кА, генерируется сильное импульсное азимутальное магнитное поле, вызывающее появление в воздушной среде вокруг указанного высокотемпературного тора внешнего вихревого радиального электрического поля ШМ с напряженностью  $E_{et}$ . Возможный амплитудный уровень величины  $E_{et}$  в воздушной зоне вокруг энергетического ядра и потенциальной оболочки ШМ (при  $r_0 \approx 2r_T \approx 40,4$  мм [1,11]) может быть оценен по приближенному расчетному волновому соотношению  $E_{et} \approx (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2} \cdot H_{et}$ , где  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная [7]. Поэтому при  $H_{et} \approx 0,34 \cdot 10^6$  А/м численное значение напряженности  $E_{et}$  вихревого радиального электрического поля в зоне ядра и оболочки ШМ окажется примерно равным  $1,28 \cdot 10^8$  В/м. При учете влияния микродиполей воды, присутствующих в огромном количестве в высокополяризованной водяной оболочке ШМ, амплитудный уровень напряженности  $E_{et} \approx (\mu_0 / \epsilon_0 \epsilon_r)^{1/2} \cdot H_{et}$ , где  $\epsilon_r \approx 81$  – относительная диэлектрическая проницаемость воды [7], может снизиться до численных значений, равных около  $1,42 \cdot 10^7$  В/м. Отсюда следует важный вывод о том, что в зоне, прилегающей к энергетическому ядру ШМ, в качестве которого выступает высокопроводный тор радиусом  $r_T$  со спирально-кольцевым электронным током  $i_{et}$ , формируемый в воздушной атмосфере сильноточным разрядным каналом ЛМ в области его изгиба, генерируется сверхсильное вихревое радиальное электрическое поле [17]. Именно данное неоднородное по радиусу электрическое поле и будет согласно расчетным данным из [1,4,11] стягивать (транспортировать) из окружающей воздушной атмосферы в область энергетического ядра ШМ (в нашем случае электронного тора) дополнительные поляризованные им (этим полем) полярные молекулы и микросфериоды воды и тем самым автоматически участвовать в активном и быстром (за десятки микросекунд [11]) формировании высокополяризованной водяной оболочки ШМ. Здесь необходимо отметить то, что процесс формирования высокополяризованной водяной оболочки ШМ был достаточно подробно рассмотрен ранее в [1-3,11].

**2.3. Расчетная оценка времени "жизни" спирально-кольцевого электронного тока в ядре ШМ.** Сформировавшийся вокруг разрядного канала ЛМ высокопроводный электронный тор со спирально-кольцевым током проводимости  $i_{et}$  должен обладать таким собственным временем "жизни"  $\tau_T$ , которое превышает время развития и протекания в воздушной атмосфере ЛМ. В предложенной электродинамической модели ШМ именно время "жизни"  $\tau_T$  электронного тора с кольцевым током  $i_{et}$  – этого своеобразного энергетического ядра ШМ после исчезновения канала разряда ЛМ и будет определять время "жизни"  $\tau_L$  ШМ в целом. В этой связи важным моментом в процессе формирования природной или искусственной ШМ является возможный электрофизический механизм отделения (отрыва) образовавшегося электронного тора со спирально-кольцевым током проводимости  $i_{et}$  от породившего его сильноточного канала воздушного электрического разряда. Здесь, по-моему мнению,

возможны два варианта наступления подобного события. Первый – "пассивный", сводящийся к самопре-кращению протекания в канале разрядного тока  $i_p$  и последующему автономному существованию в воздушной атмосфере образовавшегося электронного тора с кольцевым током  $i_{eT}$ . Второй – "активный", базирующийся на известном в плазменной технике физическом принципе ускорения высокоионизированных плазменных образований-перемычек между двумя массивными токопроводами с противоположно направленными электрическими токами [9, 13]. Этот принцип сейчас широко используется в рельсотронах – высоковольтных электрофизических установках для ускорения низкотемпературной плазмы [18]. На мой взгляд, второй вариант обретения потенциальным ядром ШМ – электронным кольцом с током проводимости  $i_{eT}$  своей автономности является более реалистичным. Ведь электродинамическое усилие  $F_{ep}$ , действующее, например, на изогнутую часть сильноточного плазменного канала разряда ЛМ длиной порядка  $2\pi r_k$  (в нашем случае это будет участок канала длиной до 108 мм) и отбрасывающее ее совместно со связанным с нею высокопроводным электронным тором радиусом  $r_T$  в радиальном направлении от продольной оси разрядного канала, может при используемых нами АВП тока  $i_p$  грозового разряда ( $I_{mp} \approx 200$  кА;  $t_{mp} \approx 10$  мкс;  $r_k \approx 17,2$  мм;  $H_p \approx 1,57 \cdot 10^6$  А/м) численно составлять до  $F_{ep} \approx 2\pi\mu_0 H_p I_{mp} r_k \approx 4,26 \cdot 10^4$  Н (около  $4,35 \cdot 10^3$  кГ) [7]. Таких усилий согласно [19] достаточно для ликвидации случайно образовавшегося в воздушной атмосфере изгиба плазменного канала разряда ЛМ (например, из-за резкой неоднородности входящих в нее непроводящих частиц-ингредиентов или образования вакуумных полостей на пути развития газового разряда) и самоотрыва в этой зоне будущего энергетического ядра ШМ от приканальной области и его дальнейшего самостоятельного пребывания в насыщенной водяными парами воздушной атмосфере.

Численную оценку значения времени "жизни"  $\tau_T$  в воздушной атмосфере рассматриваемого высокотемпературного электронного макротора радиусом  $r_T$  с током проводимости  $i_{eT}$ , являющегося энергетическим ядром ШМ, осуществим по следующему приближенному соотношению:

$$\tau_T \approx \frac{3L_T}{R_T}, \quad (18)$$

где  $L_T = \mu_0 r_T [\ln(4\pi r_T / r_{eT}) - 2,45]$  [17],  $R_T = 2r_T / (\gamma_T r_{eT}^2)$  – соответственно индуктивность и активное сопротивление электронного макротора с радиусами образующей  $r_T$ , круглого поперечного сечения  $r_{eT}$  и удельной электропроводностью  $\gamma_T$  его высокоеионизированного материала.

Такой чисто электротехнический подход к определению величины времени "жизни"  $\tau_T$  приводит нас при используемых параметрах макротора к тому, что для обеспечения его значений по (18) до нескольких секунд величина удельной электропроводности  $\gamma_T$  материала этого электронного тора-кольца должна быть равной около  $5,8 \cdot 10^{11}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>, то есть практически на четыре порядка превышать удельную электропроводность меди  $\gamma_{Cu}$  при нормальных атмосферных условиях. Возможно ли такое вообще? Прежде чем ответить на этот непростой вопрос, во-первых, укажем то, что согласно [12] для полностью ионизированной плазмы ее удельная электропроводность не

зависит от концентрации электронов  $n_e$  в ней и определяется только электронной температурой  $T_e$ . Выбранная нами в проведенных расчетных оценках плотность электронов  $n_e \approx 7 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup> для высокоионизированной плазмы тора-кольца является характерной величиной для сильноточных электрических разрядов в газовых средах и поэтому по величине  $n_e$  вопросов возникать не должно. Что же касается электронной температуры  $T_e$  в этой плазме, то уже только один полученный нами классическим расчетным путем уровень индуцированного напряжения  $U_e \approx -44,5$  В от внешнего магнитного потока  $\Phi_B$  канала разряда ЛМ в зоне его изгиба в электронном торе радиусом  $r_T \approx 20,2$  мм указывает на то, что величина температуры  $T_e$  в нем может достигать огромных значений. Ведь указанное значение  $U_e$  для ускоряемых в макроторе нерелятивистских электронов соответствует максимальной электронной температуре  $T_{em}$ , равной примерно 44,5 эВ или  $0,516 \cdot 10^6$  К [13]. Во-вторых, здесь следует принять во внимание высказанную нами чуть выше мысль о возможности практически бесстолкновительного характера ускорения рассматриваемых электронов с ларморовскими радиусами  $r_e$  внутри элементарных полых протонных торов с главными радиусами  $r_{T\phi}$  и ларморовскими радиусами  $r_p >> r_e$ . Так как на пути ускорения индуцируемым напряжением  $U_e$  этих электронов, обжатых снаружи протонными микроторами радиусом  $r_p$ , из-за наступившего в слабоионизированной плазме вокруг разрядного канала пространственного разделения электрических зарядов практически нет иных частиц, выполняющих роль центров их рассеяния, то образуемые подобными электронами высокопроводные элементарные торы-кольца с электронными токами  $i_{eT\phi}$  и главными радиусами  $r_{T\phi}$  могут иметь значения своей удельной электропроводности  $\gamma_T >> \gamma_{Cu}$ .

Подставив в (18) соответствующие геометрические и электрофизические параметры ( $r_T \approx 20,2$  мм;  $r_{eT} \approx 1$  мм;  $\gamma_T \approx 5,8 \cdot 10^{11}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>), получаем, что величина времени "жизни"  $\tau_T$  эквивалентного макротору из спирально-кольцевого электронного тока  $i_{eT}$ , защищенного от окружающего холодного воздуха элементарными тепловыми экранами из полых протонных микроторов с ларморовскими радиусами  $r_p$ , в предложенном энергетическом ядре ШМ может составлять около 3,4 с. Приближенно описав основные этапы процесса возможного создания в зоне изгиба сильноточного разрядного канала ЛМ или дугового разряда высокопроводного тора радиусом  $r_T$  со спирально-кольцевым электронным током  $i_{eT}$  и его последующего электродинамического отрыва от канала разряда и автономного существования в воздушной атмосфере, автор на этом завершает рассмотрение процесса формирования энергетического ядра ШМ и переходит к не менее важной задаче для этого вида молнии, связанной с приближенной расчетной оценкой значений тока смещения в водяной оболочке ШМ.

**2.4. Расчетная оценка радиальных токов смещения в поляризованной водяной оболочке ШМ.** При распространении в ядре ШМ вдоль электронного макротора с радиусом  $r_T$  кольцевого импульсного тока электронной проводимости  $i_{eT}$  возникающая в окружающей его диэлектрической среде поперечная электромагнитная волна будет приводить к возникновению в плоскостях, перпендикулярных к направлению

протекания кольцевого тока проводимости  $i_{eT}$ , соответствующих замкнутых токов смещения  $i_c$ . Направления протекания данных токов смещения  $i_c$  при этом будут совпадать с направлениями векторов напряженности  $E_{eT}$  сверхсильного вихревого радиального электрического поля, генерируемого кольцевым током проводимости  $i_{eT}$ . Для тока электрического смещения  $i_c$ , протекающего в высокополяризованной водяной оболочке ШМ, будет справедливо следующее приближенное соотношение:

$$i_c \approx \delta_c \cdot S_c, \quad (19)$$

где  $\delta_c$  – плотность тока смещения;  $S_c = 4\pi r_0^2$  – площадь наружной поверхности водяной оболочки ШМ (в принятом согласно [1, 11] приближении  $r_0 \approx 2r_T$ ).

В соответствии с известными положениями классической электродинамики выражение для плотности тока электрического смещения  $\delta_c$  в высокополяризованной водяной оболочке ШМ имеет следующий вид [7, 13]:

$$\delta_c = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{\partial E_{eT}}{\partial t}. \quad (20)$$

Для оценки скорости изменения во времени  $t$  напряженности  $E_{eT}$  сверхсильного вихревого радиального электрического поля в области водяной оболочки ШМ воспользуемся соотношением вида:

$$\frac{\partial E_{eT}}{\partial t} \approx \left( \frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{1/2} \cdot \frac{\partial H_{eT}}{\partial t}. \quad (21)$$

В свою очередь, для временной производной  $\partial H_{eT}/\partial t \approx dH_{eT}/dt$  запишем следующее выражение:

$$\frac{dH_{eT}}{dt} \approx (2r_T)^{-1} \cdot \frac{di_{eT}}{dt}. \quad (22)$$

Что касается временной производной тока  $di_{eT}/dt$  для макротора с радиусом  $r_T$ , то ее значение будем определять из уравнения цепи для этого 'электронного тора с током проводимости  $i_{eT}$  вида:

$$U_e \approx L_T \cdot \frac{di_{eT}}{dt} + R_T \cdot i_{eT}. \quad (23)$$

Из (23) для принятых геометрических параметров тора ( $r_T \approx 20,2$  мм;  $r_{eT} \approx 1$  мм) при  $|U_e| \approx 44,5$  В,  $L_T \approx 7,83 \cdot 10^{-8}$  Гн,  $R_T \approx 6,96 \cdot 10^{-8}$  Ом и  $i_{eT} \approx 13,87$  кА следует, что максимальное значение для токовой производной  $di_{eT}/dt$  оказывается примерно равным  $5,68 \cdot 10^8$  А/с. Видно, что падением электрического напряжения на активном сопротивлении  $R_T$  образовавшегося снаружи разрядного канала ЛМ в зоне его изгиба электронного тора с током проводимости  $i_{eT}$  согласно (23) можно пренебречь. Тогда с учетом (21) и (22) для временной производной  $\partial E_{eT}/\partial t$  в поляризованной водяной оболочке ШМ находим, что ее наибольшее значение может быть численно равным около  $0,59 \cdot 10^{12}$  В/(м·с). Согласно (20) такое значение производной  $\partial E_{eT}/\partial t$  вызывает появление в водяной оболочке ШМ плотности тока смещения, приближенно равного  $\delta_c \approx 423,1$  А/м<sup>2</sup>. В результате из (19) при  $r_0 \approx 40,4$  мм и найденном численном значении величины  $\delta_c$  получаем, что в предложенной электродинамической модели ШМ применительно к вызывающему ее в воздушной атмосфере сильноточному разряду ЛМ ( $I_{mp} \approx 200$  кА;  $t_{mp} \approx 10$  мкс;  $r_k \approx 17,2$  мм) ток смещения  $i_c$  в ее высокополяризованной водяной оболочке достигает уровня примерно в 8,7 А. Необходимо отметить, что такая сравнительно большая величина тока электрического смещения  $i_c$  в соответствии с теорией электромагнитного поля

Максвелла не будет выделять джоулева тепла в указанной водяной оболочке ШМ и окружающем его холодном воздухе. По-видимому, данный ток смещения  $i_c$  будет приводить к энергетическому возбуждению валентных электронов атомов газообразных химических элементов, захваченных полярными молекулами воды из атмосферного воздуха по пути своего радиального движения к энергетическому ядру ШМ (к тору с кольцевым током проводимости  $i_{eT}$ ) и присутствующих в водяной оболочке ШМ. Поэтому такой ток электрического смещения  $i_c$  будет в состоянии создавать в электронейтральной высокополяризованной оболочке ШМ электролюминесценцию [7, 13], обычно наблюдаемую (в том числе и очевидцами наблюдений природной ШМ [5, 10]) в виде холодного свечения атомов газов, присутствующих в атмосферном воздухе. Отсюда теперь нам становятся физически более понятными те опытные факты из описательных наблюдений очевидцев природной ШМ, которые касаются практического отсутствия поступления от этого вида молнии в окружающий атмосферный воздух теплового излучения.

## ВЫВОДЫ

1. На основе известных положений классической электродинамики показана возможность пространственного разделения свободных электронов и наиболее легких однозарядных ионов (на примере протонов) в слабоионизированной плазме, окружающей в воздушной атмосфере сильноточный высокоионизированный канал разряда ЛМ или дугового разряда с током КЗ. Образующиеся при этом элементарные электронные диаметром  $2r_e$  и протонные диаметром  $2r_p$  кольца-торы с вращающимися с огромными циклотронными частотами  $\omega_e$  и  $\omega_p$  по ларморовским  $r_e$  и  $r_p$  микrorадиусам электронами и протонами охватывают круговые линии магнитной индукции вблизи сильноточного разрядного канала. Диаметр  $2r_p$  протонных колец в десятки раз (в нашем случае примерно в 42,8 раз) превышает диаметр  $2r_e$  электронных колец, расположенных в огромном количестве внутри первых.

2. Установлено, что в зоне изгиба канала разряда ЛМ или дугового разряда с током КЗ из-за возникновения возможности индукционного наведения в проводящих электронных и протонных микрокольцах продольных ЭДС происходит образование элементарных электронных и протонных микроторов со спирально-кольцевыми импульсными токами проводимости, направленными в противоположные стороны. Циклоидальные импульсные электронные токи проводимости в данных торах в десятки раз (в нашем случае примерно в 42,7 раз) превышают циклоидальные импульсные протонные токи проводимости, протекающие в соответствующих торах с диаметром  $2r_p \gg 2r_e$ , и выполняют основную электрофизическую роль в формировании высокотемпературного торoidalного энергетического ядра ШМ.

3. Расчетным путем показано, что суммарный спирально-кольцевой импульсный электронный ток проводимости  $i_{eT}$  высокотемпературного торoidalного энергетического ядра ШМ генерирует вокруг ядра ШМ сильное импульсное азимутальное магнитное поле, которое, в свою очередь, вызывает появление вокруг сформированного ядра-тора ШМ сверхсильного вихревого радиального электрического поля. Данное сверхсильное вихревое радиальное элек-

трическое поле из полярных молекул и микросфериодов воды воздушной атмосферы формирует вокруг высокотемпературного тороидального энергетического ядра ШМ сферообразную многослойную высоко-поляризованную водяную оболочку.

4. Выполненные оценочные расчеты показывают, что в предложенной модели ШМ при принятом значении  $\gamma_T$  время "жизни"  $\tau_T$  спирально-кольцевого электронного тока проводимости  $i_{eT}$  высокотемпературного тороидального энергетического ядра ШМ и ШМ в целом может составлять до нескольких секунд. При больших значениях удельной электропроводности  $\gamma_T$  высокоионизированного материала эквивалентного кольца данного тока проводимости  $i_{eT}$  в ядре ШМ время его "жизни"  $\tau_T$  и соответственно время "жизни"  $\tau_L$  ШМ в целом будет возрастать прямо пропорционально этому увеличению величины  $\gamma_T$ .

5. Расчетная оценка тока электрического смещения  $i_c$  в высокополяризованной водяной оболочке ШМ, создаваемой в зоне изгиба сильноточного разрядного канала ЛМ, свидетельствует о том, что в соответствии с предложенной электродинамической моделью ШМ и принятыми для нее исходными АВП разрядного тока ЛМ он может в указанной водяной оболочке составлять до 9 А и вызывать электроломинесценцию (холодное свечение) в атомах газообразных элементов, входящих в состав атмосферного воздуха и присутствующих в водяной оболочке ШМ.

6. Несомненный интерес представляет экспериментальная проверка принципиальной возможности создания в лаборатории искусственных низкоэнергетических плазмоидов ШМ, подобных описанному выше. Некоторые результаты такой проверки автор представит в следующем номере данного журнала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранов М.И. Электрофизическая природа шаровой молнии // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 15-25.
- Баранов М.И. Электрическая корона в микродипольной модели шаровой молнии // Электричество. – 2010. – № 1. – С. 23-28.
- Баранов М.И. Расчетная оценка температуры в микродипольной модели шаровой молнии // Электричество. – 2010. – № 6. – С. 15-20.
- Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М. Электрический транспорт полярных молекул воды в неоднородном электрическом поле полимерной изоляции высоковольтных кабелей // Технічна електродинаміка (Киев). – 2010. – № 5. – С. 3-9.
- Смирнов Б.М. Физика шаровой молнии // Успехи физических наук. – 1990. – Том 160. – Вып. 4. – С. 1-45.
- Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита. – М.: Знак, 2003. – 330 с.
- Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
- Духин С.С., Дерягин Б.В. Электрофорез. – М.: Наука, 1976. – 550 с.
- Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. – М.: Атомиздат, 1977. – 384 с.
- Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. – М.: Научный мир, 1996. – 264 с.
- Никитин А.И. Образование шаровой молнии при развитии линейной молнии // Электричество. – 2000. – № 3. – С. 1-6-23.
- Бортник И.М., Белогловский А.А., Верещагин И.П. и др. Электрофизические основы техники высоких напряжений / Под общ. ред. И.П. Верещагина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.
- Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
- Баранов М.И. Приближенный расчет максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда высоковольтного воздушного коммутатора атмосферного давления // Технічна електродинаміка (Киев). – 2010. – № 5. – С. 18-21.
- Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.
- Баранов М.И. Электрофизический микромеханизм явления электромагнитной индукции в неподвижном металлическом проводнике // Электричество. – 2012. – № 1. – С. 36-42.
- Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
- Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
- Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Baranov M.I. 'Elektrofizicheskaya priroda sharovoj molnii' // 'Elektrичество'. – 2009. – № 9. – S. 15-25. 2. Baranov M.I. 'Elektrofizicheskaya korona v mikrodipol'noj modeli sharovoj molnii' // 'Elektrичество'. – 2010. – № 1. – S. 23-28. 3. Baranov M.I. Raschetnaya ocenka temperatury v mikrodipol'noj modeli sharovoj molnii' // 'Elektrичество'. – 2010. – № 6. – S. 15-20. 4. Scherba A.A., Podol'cev A.D., Kucheryavaya I.N., Zolotarev V.M. 'Elektricheskij transport polyarnyh molekul vody v neodnorodnom elektricheskom pole polimernoj izolyacii vysokovol'tnyh kablej' // 'Tehnichna elektrodynamicika' (Kiev). – 2010. – № 5. – S. 3-9. 5. Smirnov B.M. Fizika sharovoj molnii' // 'Uspehi fizicheskikh nauk'. – 1990. – Tom 160. – Vyp. 4. – S. 1-45. 6. Kuzhekin I.P., Larionov V.P., Prohorov E.N. Molniya i molniezaschita. – M.: Znak, 2003. – 330 s. 7. Yavorskij B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike. – M.: Nauka, 1990. – 624 s. 8. Duhin S.S., Deryagin B.V. 'Elektroforez'. – M.: Nauka, 1976. – 550 s. 9. Golant V.E., Zhilinskij A.P., Saharov I.E. Osnovy fiziki plazmy. – M.: Atomizdat, 1977. – 384 s. 10. Stahany I.P. O fizicheskoy prirode sharovoj molnii. – M.: Nauchnyj mir, 1996. – 264 s. 11. Nikitin A.I. Obrazovanie sharovoj molnii pri razvitiu linejnnoj molnii' // 'Elektrичество'. – 2000. – № 3. – S. 1-6-23. 12. Bortnik I.M., Beloglovskij A.A., Vereschagin I.P. i dr. 'Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokih napryazhenij' / Pod obsch. red. I.P. Vereschagina. – M.: Izdatel'skij dom M'Ei, 2010. – 704 s. 13. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 14. Baranov M.I. Priblizhennyj raschet maksimal'noj temperatury plazmy v sil'notochnom kanale iskrovogo razryada vysokovol'tnogo vozduzhnogo kommutatora atmosfernogo davleniya // 'Tehnichna elektrodynamicika' (Kiev). – 2010. – № 5. – S. 18-21. 15. Lozanskij E.D., Firsov O.B. Teoriya iskry. – M.: Atomizdat, 1975. – 272 s. 16. Baranov M.I. 'Elektrofizicheskij mikromehanizm yavleniya elektromagnitnoj indukcii v nepodvizhnym metallicheskom provodниke' // 'Elektrичество'. – 2012. – № 1. – S. 36-42. 17. Knopfel G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polya. – M.: Mir, 1972. – 391 s. 18. Mesyac G.A. Impul'snaya energetika i elektronika. – M.: Nauka, 2004. – 704 s. 19. Rajzer Yu.P. Fizika gazovogo razryada. – M.: Nauka, 1987. – 592 s.

Поступила 11.01.2013

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния"

Национального технического университета  
"Харьковский политехнический институт"  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47  
тел. (057) 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

**Improvement of microdipole model of ball lightning and electrodynamic development of theory of this phenomenon.**  
The new electrodynamic model of ball lightning (BL), containing an internal high temperature as a torus power kernel and external electro-neutral high-polarized aquatic shell, is offered. The power kernel of such BL is formed by electronic and proton microtorus with the elementary spiral-circular currents, directed in opposite sides. The spiral-circular electronic currents of conductivity of kernel of BL create the strong impulsive azimuthal magnetic field and superstrong vortical radial electric field round him.

**Key words – ball lightning, kernel and shell, theory.**

## УПРАВЛЯЕМОСТЬ ПРОЦЕССОМ БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

*У статті представлені експериментальні дослідження дозування та керованості процесу бесконтактного магнітно-імпульсного рихтування. Наведені ілюстрації дозування магнітно-імпульсного впливу на прикладі елемента кузовної панелі автомобіля "Субару". Продемонстровано, що процес бесконтактного рихтування відбувається без пошкодження захисного лакофарбного покриття панелі автомобіля.*

*В статье представлены экспериментальные исследования дозирования и управляемости процесса бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. Приведены иллюстрации дозированного магнитно-импульсного воздействия на примере элемента кузовной панели автомобиля "Субару". Продемонстрировано, что процесс бесконтактной рихтовки происходит без повреждения защитного лакокрасочного покрытия панели автомобиля.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** С каждым годом в мире огромными темпами растет количество автомобилей. Украина занимает 65 место в общемировом рейтинге по количеству автомобилей на душу населения, имея показатель в 98 машин на 1000 населения. Но, к сожалению, вместе с ростом количества автотранспортных средств, растет и количество ДТП с их участием, в которых, в той или иной степени, но обязательно повреждается панели кузовных элементов автомобилей. Поэтому, операции связанные с ремонтом и реставрацией панелей кузовов автомобилей являются весьма актуальными и пользуются все большим спросом. Причем, как показывают статистические данные, до 80% повреждений приходится на небольшие и средние повреждения. Половина из них – это вмятины, не требующие замены всего элемента и устранимые рихтовкой. Более 50% таких повреждений составляют зоны с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. В этой связи особый интерес представляют методы восстановления кузовов автомобилей, позволяющие произвести, так называемую, внешнюю рихтовку без разборки кузовных элементов и нарушения существующего защитного покрытия [1-3].

**Анализ основных достижений и публикаций.** Методы и способы магнитно-импульсного ремонта и восстановления кузовов и корпусов транспортных средств имеют одну отличительную особенность, которая особо ярко отражает их преимущества (актуальность, перспективность) по сравнению с традиционными методами [4]. Данная особенность заключается в том, что возбуждаемые усилия, для выполнения производственной операции ремонта, рихтовки или восстановления элементов кузовов являются дозированными и управляемыми [1]. Т.е., энергии затрачивается ровно столько, сколько необходимо и достаточно для проведения данной производственной операции, при этом сама операция является гибкой и управляемой. Это достигается выбором точного значения необходимых дозируемых усилий [1, 5-7].

Одно из первых предложений по созданию устройств магнитно-импульсного притяжения тонкостенных металлов было сформулировано в патенте H. Furth [8]. Физическая сущность данного предложения сводится к возбуждению "медленного" и "быстрого" магнитных полей с разными временными ха-

рактеристиками. В результате наложения этих полей в рабочей области индуктора реализуется магнитно-импульсное притяжение обрабатываемого металла к индуктору.

Патент H. Furth не нашёл своего практического воплощения (большая сложность в технической реализации), хотя авторы следующих, более поздних и более удачных проектов ссылаются на него, как на первоисточник в направлении развития систем для магнитно-импульсного притяжения.

К таковым относятся, например, изобретения инженеров "Boeing Company" K. Hansen, I. Hendrickson, P. Zieve и др. [9, 10]. Следует подчеркнуть, что физическая сущность цитируемых разработок принципиально не отличается от физической сущности заявки H. Furth. Здесь также речь идёт о суперпозиции "медленного" и "быстрого" полей. Но теперь уже авторы говорят о наложении низкочастотного и высокочастотного сигналов в обмотке инструмента-индуктора.

Такие двухчастотные системы нашли свое практическое применение в работах по реставрации корпусов самолётов. В последующем на базе этих разработок из корпорации "Boeing Company" выделились фирмы "Electroimpact" и "Fluxtronic" (США), специализирующиеся именно на магнитно-импульсных технологиях по притяжению металлов [11, 12].

Следует отметить, что все рассмотренные системы работают, в основном, в однократном режиме работы, хотя фирмы "Electroimpact" и "Fluxtronic" говорят о возможности их применения и в серийном режиме работы.

**Целью настоящего рассмотрения** является иллюстрация управляемости процесса магнитно-импульсного ремонта (формовки, рихтовки, восстановления), осуществляемого с помощью разработанного комплекса для бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальном комплексе для бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки, созданном на базе магнитно-импульсной установки МИУС-2, разработанной в лаборатории электромагнитных технологий

ХНАДУ (рис. 1) [3,5-7].

Технические характеристики комплекса:

- запасаемая энергия  $W \sim 2 \text{ кДж}$ ;
  - напряжение питающей сети  $\sim 380/220\text{В}$ ;
  - ёмкость конденсаторов  $- C = 1200 \text{ мкФ}$ ;
  - собственная частота  $- f_0 \sim 7 \text{ кГц}$ ;
  - собственная индуктивность  $- L \sim 440 \div 500 \text{ нГн}$ ;
  - напряжение заряда емкостных накопителей  $U \sim 100 \div 2100 \text{ В}$ ;
  - частота следования разрядных импульсов  $f_{\text{имп}} \sim 1 \div 10 \text{ Гц}$ ;
  - тип коммутаторов – тиристорные ключи;
  - режим работы:
    - а) апериодический (разрядный импульс унипольярной формы);
    - б) колебательный (разрядный импульс – затухающая синусоида).
- Условия эксперимента:
- частота следования импульсов – 9 Гц;
  - количество импульсов – серии до 50;
  - апериодический режим работы источника мощности, рабочая частота тока в импульсе  $\sim 2 \text{ кГц}$ ;
  - напряжение на емкостном накопителе источника мощности – 1800 В;
  - амплитуда тока в разрядном контуре источника мощности – 18 кА;
  - амплитуда тока в инструменте магнитно-импульсной рихтовки – 90 кА;
  - запасаемая источником мощности энергия – 1,8 кДж.



Рис. 1. Экспериментальный комплекс бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки: 1 – инструмент магнитно-импульсного воздействия; 2 – кабельный подвод; 3 – магнитно-импульсная установка МИУС-2

Для проведения эксперимента были взяты образцы панели кузова автомобиля фирмы "Субару" толщиной  $\sim 0,8 \text{ мм}$ .

В процессе проведения экспериментальных исследований было сделано два опыта:

- Опыт № 1 Трансформация выпуклости в соответствующую вогнутость на образце обшивки кузова ав-

томобиля "Субару";

- Опыт № 2 Удаление выпуклости на образце обшивки кузова автомобиля "Субару".

Ниже представлена иллюстрации проведенных экспериментальных исследований в соответствии с указанными опытами.

**Опыт № 1.** Результаты экспериментальных исследований по опыту №1 представлены на рис. 2.

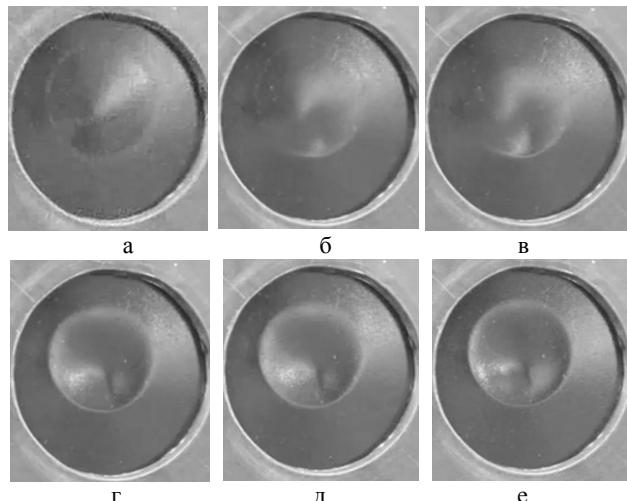


Рис. 2. Дозированная трансформация выпуклости в соответствующую вогнутость на образце обшивки кузова автомобиля "Субару": а – экспериментальный образец с созданной выпуклостью; б – магнитно-импульсное притяжение при воздействии серии из 10 разрядных импульсов; в – при воздействии 12 разрядных импульсов; г – при воздействии 22 разрядных импульсов; д – при воздействии 32 разрядных импульсов; е – при воздействии 42 разрядных импульсов

**Опыт № 2** Результаты экспериментальных исследований по опыту №2 представлены на рис. 3.

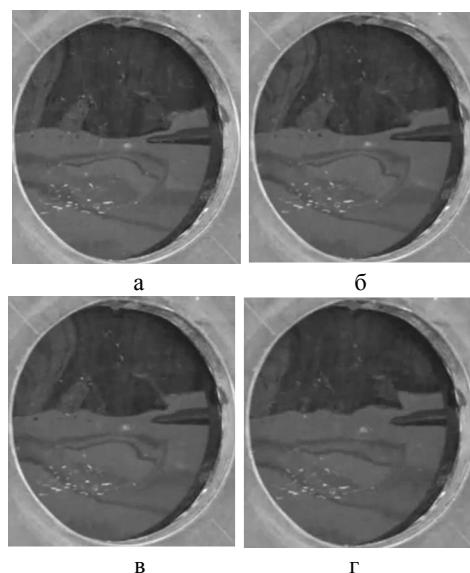


Рис. 3. Удаление выпуклости на образце обшивки кузова автомобиля "Субару": а – экспериментальный образец с выпуклостью; б – магнитно-импульсное удаление выпуклости при воздействии серии из 10 разрядных импульсов; в – при воздействии 20 разрядных импульсов; г – при воздействии 30 разрядных импульсов

## ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Магнитно-импульсные методы ремонта и реставрации кузовов автотранспортных средств позволяют обеспечить дозируемость и управляемость силового воздействия при выполнении заданной производственной операции.

2. В процессе выполнения операции ремонта, оператор имеет возможность отслеживать интенсивность и уровень силового воздействия, при этом определять необходимое количество силовых импульсов.

3. Операция ремонта и восстановления панелей кузовного покрытия автомобиля происходит бесконтактно и без повреждения защитного (лакокрасочного) покрытия.

4. Магнитно-импульсные методы ремонта позволяют, как создавать необходимые деформации на панелях кузовных элементов автомобиля, так и эффективно удалять на них вмятины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесконтактная внешняя магнитно-импульсная рихтовка автомобильных кузовов. Сборник трудов XV международной научно-технической конференции ["Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы"], (Севастополь, 10-17 сентября 2012 г.) / А.В. Гнатов – Севастополь: Вестник СевНТУ, 2012. – №. 134. – С. 131–134.
2. Гнатов А.В. Безконтактне магнітно-імпульсне рихтування автомобільних кузовів. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції ["Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій"]. (Тернопіль, 19-21 травня 2010 р.). – Тернопіль: Вісник ТДТУ, 2010. – Т. 15. – № 2. – С. 164-171.
3. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / Туренко А. Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В.; монография. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
4. Кузовной ремонт легковых автомобилей Мн.: Авто-стиль, 2003. – 272 с.
5. Лаборатория электромагнитных технологий // Матеріали сайту – 2012. – Режим доступу: <http://electromagnetic.comoj.com>.
6. Батыгин Ю.В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, С.А. Щиголева // Электричество. – 2011. – № 4. – С. 55-62.
7. Батыгин Ю.В. Магнитно-импульсное притяжение/отталкивание тонкостенных листовых ферромагнетиков / Ю.В. Батыгин, А. В. Гнатов // Электричество. – 2012. – № 8. – С. 58-65.
8. Пат. 3,196,649 USA (США). Devices for metal-forming by magnetic tension / Harold P. Furth; заявитель и патентообладатель Advanced Kinetiks, Inc., Costa Mesa, California. – № 173,680; заявл. 16.02.1962; опубл. 27.07.1965.
9. Пат. 3,998,081 USA (США), B21D 26/14. Electromagnetic dent puller / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; заявитель и патентообладатель The Boeing Company, Seattle, Wash. – № 489,290 ; заявл. 17.07.1974; опубл. 21.12.1976.
10. Пат. 5,046,345 USA (США), B21D 1/06. Power supply for electromagnetic proof load tester and dent remover / Zieve Peter B.; заявитель и патентообладатель Peter B. Zieve. – № 451,106 ; заявл. 15.12.1989; опубл. 10.09.1991.
11. Electromagnetic Dent Removal // Матеріали сайту – 2013. – Режим доступу: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>.
12. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover // Матеріали сайту – 2013. – Режим доступу: <http://www.fluxtronic.com>.

Peter B.; заявитель и патентообладатель Peter B. Zieve. – № 451,106 ; заявл. 15.12.1989; опубл. 10.09.1991.

11. Electromagnetic Dent Removal // Матеріали сайту – 2013.

– Режим доступу:<http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>.

12. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover // Матеріали сайту – 2013. – Режим доступу: <http://www.fluxtronic.com>.

**Bibliography (transliterated):** 1. Beskontaktnaya vnesnyaya magnitno-impul'snaya rihovka avtomobil'nyh kuzovov. Sbornik trudov HV mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii ["Avtomobil'nyj transport: problemy i perspektivy"], (Sevastopol', 10-17 sentyabrya 2012 g.) / A.V. Gnatov - Sevastopol': Vestnik SevNTU, 2012. - №. 134. - S. 131-134. 2. Gnatov A.V. Bezkontaktnye magnitno-impul'snye rihuvannya avtomobil'nih kuzoviv. Materiali mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii ["Fundamentalni ta prikladni problemi suchasnih tehnologij"]. (Ternopil', 19-21 travnya 2010 r.). - Ternopil': Vismik TDTU, 2010. - T. 15. - № 2. - S. 164-171. 3. Turenko A.N. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij. T. 3. Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostenniy metallov impul'snymi magnitnymi polyami / Turenko A. N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V.; monografiya. - Har'kov: HNADU, 2009. - 240 s. 4. Kuzovnoj remont legkovyh avtomobilej Mn.: Avtostil', 2003. - 272 s. 5. Laboratoriya `elektromagnitnyh tehnologij // Materiali sajtu - 2012. - Rezhim dostupu: <http://electromagnetic.comoj.com>. 6. Batygin Yu.V. Prityazhenie tonkostenniyh metallicheskikh listov magnitnym polem odnovitkovogo induktora / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, S.A Schigoleva // `Elektrichestvo. - 2011. - № 4. - S. 55-62. 7. Batygin Yu.V. Magnitno-impul'snoe prityazhenie/ottalkivanie tonkostenniyh listovyh ferromagnetikov / Yu.V. Batygin, A. V. Gnatov // `Elektrichestvo. - 2012. - № 8. - S. 58-65. 8. Pat. 3,196,649 USA (SShA). Devices for metal-forming by magnetic tension / Harold P. Furth; zayavitel' i patentoobladatel' Advanced Kinetiks, Inc., Costa Mesa, California. - № 173,680; zayavl. 16.02.1962; opubl. 27.07.1965. 9. Pat. 3,998,081 USA (SShA), B21D 26/14. Electromagnetic dent puller / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; zayavitel' i patentoobladatel' The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 489,290 ; zayavl. 17.07.1974; opubl. 21.12.1976. 10. Pat. 5,046,345 USA (SShA), B21D 1/06. Power supply for electromagnetic proof load tester and dent remover / Zieve Peter B.; zayavitel' i patentoobladatel' Peter B. Zieve. - № 451,106 ; заявл. 15.12.1989; опубл. 10.09.1991. 11. Electromagnetic Dent Removal // Materiali sajtu - 2013. - Rezhim dostupu: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>. 12. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover // Materiali sajtu - 2013. - Rezhim dostupu: <http://www.fluxtronic.com>.

Поступила 04.03.2013

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.

**Controllability of non-contact magnetic pulse straightening.**

Experimental research on dosing and controllability of non-contact magnetic pulse straightening is presented in the article. Illustrations of dosed magnetic-pulse action are given by the example of an element of a Subaru body panel. It is demonstrated that non-contact straightening does not damage the protective paint coating of a car body.

**Key words – electromagnetic forming, non-contact straightening, magnetic-pulse action, magnetic pulse installation, dents removal, repair of vehicles.**

## СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЗАЛІЗНИЦЬ

*Проведено системний аналіз схем зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць за період 1993-2011 роки та проектів схем на перспективу до 2016 року в умовах ринкової економіки і нормативних вимог електроенергетики України.*

*Проведен системный анализ схем внешнего электроснабжения тяговых подстанций железных дорог за период 1993-2011 годы и проектов схем на перспективу до 2016 года в условиях рыночной экономики и нормативных требований электроэнергетики Украины.*

Основна електрифікація залізничного транспорту в Україні здійснена в 60-80 роки минулого століття, коли за рік вводилося в експлуатацію 500-600 км нових електрифікованих ліній. Державна програма електрифікації залізниць за період 1994-2004 роки передбачала електрифікацію 2148 км залізниць з доведенням об'ємів перевезень електротягою до 85 %. За період з 1994-2011 роки електрифіковано більш 1700 км експлуатаційної довжини залізничних ліній, полігон електрифікованих ліній збільшено на 21 % при цьому об'єм перевезень електротягою збільшився до 89,7 %.

Станом на початок 2012 року експлуатаційна довжина електрифікованих залізниць України складає 10089 км, з яких на однофазному змінному струмі 27,5 кВ 50 Гц електрифіковано 5327 км, на постійному струмі 3,3 кВ електрифіковано 4762 км. Доля електрифікованих ділянок від загальної експлуатаційної довжини залізниць складає 46,5 %, при цьому доля електротяги в загальному вантажообігу складає 90,5 %. За абсолютною довжиною електрифікованих залізниць Україна займає 10 місце серед країн світу і 6 – серед країн Європи. Зовнішнє електропостачання тягових підстанцій побудовано на базі класичних схем [1].

Тягове електропостачання в 2012 році здійснювалось від 295 стаціонарних тягових підстанцій, 81 змінного струму (в т.ч. 7 подвійного живлення), 207 постійного струму та 12 пересувних тягових підстанцій. З 307 стаціонарних та пересувних тягових підстанцій з терміном служби понад 30 років працюють 242 стаціонарних (79 % від загальної кількості) та 12 пересувних тягових підстанцій. В експлуатації знаходиться 11 стаціонарних тягових підстанцій з одним тяговим трансформатором та 13 пересувних тягових підстанцій які мають один ввод. Для забезпечення у повній мірі вагових норм, швидкостей руху та надійності електропостачання необхідно їх модернізувати з будівництвом зовнішнього електропостачання на умовах, передбачених для споживачів із електроприймачами категорії I, в першу чергу на вантажонапруженіх та перспективних швидкісних ділянках [2, 3].

Програма електрифікації залізниць України на 2011-2016 рр., наказ № 274-Ц від 10.06.2011 р. передбачає електрифікувати 1562 км залізничних колій на ділянках, які входять у відповідні напрями розмежування руху пасажирських і вантажних поїздів для впровадження швидкісного руху по п'яти залізницях: Південній, Одеській, Придніпровській, Південно-західній і Донецькій. Це такі ділянки:

- Полтава–Красноград–Лозова на напрямі основного коридору впровадження прискорених і швидкісних поїздів Львів–Київ–Полтава–Донецьк (пуск здійснено, не завершено будівництво зовнішнього електропостачання);

- Знам'янка – Волинська – Миколаїв–Херсон–Вадим–Джанкой на напрямі руху вантажних і пасажирських поїздів для створення другого електрифікованого ходу на південь в Крим і порти Чорного моря;

- Волноваха–Камиш–Заря–Запоріжжя на напрямі переважно вантажного руху для забезпечення перевезень сировини з регіону Кривого Рогу і Запоріжжя на металургійні підприємства Донецького регіону і Маріуполя;

- Фастів–Житомир–Новоград–Волинський, де електрифікація потрібна для відхилення руху вантажних поїздів з основного пасажирського коридору на ділянці Фастів–Козятин;

- Миколаїв–Колосівка як сполучна вітка з напрямом Долинська–Миколаїв–Херсон–Вадим–Джанкой для здійснення вантажних і пасажирських перевезення з Одеси на Крим і на північ країни.

- Ворожба–Суми–Люботин на напрямі Кононів–Люботин–Полтава і далі на Захід і Південь для розвантаження напряму Конотоп–Дарниця–Київ і далі на Львів;

- Красноград–Новомосковськ для впровадження швидкісного руху на напрямі Київ–Дніпропетровськ.

З березня 2011 року по травень 2012 року встановлюються найвищі темпи електрифікації ділянок впровадження прискореного руху пасажирських поїздів Полтава–Красноград–Лозова Південної залізниці, експлуатаційною довжиною 176 км (розгорнута довжина 346,2 км). За цей період побудовано 4 стаціонарних тягових підстанції та ліній зовнішнього електропостачання на базі нових підходів [3] і проведена реконструкція стаціонарної тягової підстанції Лозова.

Електрифікація виконана на напругу 27,5 кВ змінного струму. Сумарне навантаження п'яти тягових підстанцій Південної залізниці складає 170 МВт, в тому числі: ТП Полтава – 40 МВт; ТП Карловка – 25 МВт; ТП Красноград – 40 МВт; ТП Сахновщина – 25 МВт; ТП Лозова – 40 МВт.

**Аналіз схем зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць за період 1993 – 2011 роки.** За цей період було введено у роботу 23 тягові

© І.В. Доманський

підстанції, із них як стаціонарні згідно з проектами першочергово були побудовані та включені у роботу разом із введеним у експлуатацію контактної мережі тільки дві: Чернігів і Неданчічі. Решта дільниць включалися у роботу на базі пересувних тягових підстанцій, які поступово замінялися на стаціонарні. Це привело до того, що на сьогоднішній день у роботі знаходиться 12 пересувних підстанцій. Дані підстанції мають по одному трансформатору та живлення по 1 вводу, тобто заживлені по III категорії надійності. Експлуатація у такому режимі роботи приводить до зниження надійності дільниць електрифікації і допустима тимчасово та оправдана лише відсутністю обсягів фінансування та стислими термінами виконання електрифікації, що викликані різним ростом вартості дизпалива і необхідністю зниження експлуатаційних витрат за рахунок електрифікації.

В умовах необхідності ресурсозбереження, економії енергії і зниження витрат на будівництво нових електрифікованих ліній залізниць України в цей період найбільший ефект був досягнутий при впровадженні тягової мережі змінного струму 27,5 кВ із екрануючим і посилюючими проводами і подовженими міжпідстанційними зонами. При цьому досягається наступна економія: витрати на електрифікацію 1 км колії знижаються в 1,5–2 рази; витрати на споживану енергії знижаються від 2 до 6%; втрати енергії в тягової мережі зменшуються в 1,5–1,8 рази в порівнянні зі звичайною тяговою мережею 27,5 кВ при однакових довжинах міжпідстанційних зон [2].

Загальний недолік схем зовнішнього електропостачання (ЗЕП) тягових підстанцій електрифікованих дільниць за період 1993–2011 років полягає в тому, що практично всі підстанції приєднувались до мереж 110 кВ облenerго, а ряд з них до таких мереж 110 кВ, які з'єднували різні енергосистеми. Паралельно працюючі мережі 110 кВ, 220 кВ, або 110 кВ, 330 кВ різновідні і передача потужності по них відбувається при пониженні економічності роботи мережі в цілому. Перетоки потужності по мережах 110 кВ від яких жив-

ляться тягові підстанції визивають великі втрати в електротягових мережах, особливо змінного струму ЕПП-27,5 кВ так як питомий опір електротягової мережі цієї системи менше чим звичайної 27,5 кВ [2-5].

Аналіз режимів роботи систем електричної тяги і ЗЕП показує, що перетоки потужності по тяговим мережам практично є на всіх дільницях. Експериментальні дослідження режимів роботи тягових підстанцій підтвердили наявність перетоків потужності на дільницях Жмеринка–Півволочиськ–Красне. Підстанції 330 кВ Тернопільська та Шепетівка мають з'єднання по електричній мережі 330 кВ, а також через мережу 110 кВ від якої живляться тягові підстанції дільниці Жмеринка–Півволочиськ–Красне. Так на рис. 1,а явно перевагу перетоків над електроспоживанням на тягу. Паралельно працююча електротягова мережа 27,5 кВ і мережа 110 чи 330 кВ різновідні і передача потужності по них відбувається при збільшенному значенні втрат активної потужності та енергії. З рис. 1,б слідує, що електроспоживання різних тягових підстанцій різко відрізняється по місяцях (при приблизно однаковому вантажообігу в ці місяці). Переїзд до консольних схем живлення дозволив зменшити сумарне електроспоживання групи з п'яти підстанцій приблизно на 500 тис. кВт·год на місяць, але надійність електропостачання тягових мереж знизилась. В той же час для енергосистем економічно виправданими можуть бути складні-замкнуті мережі (розподіл активних і реактивних навантажень економічніший при збереженні перетоку по мережі) і на теперішній час необхідно вводити диференційні тарифи при транзиті потужності по тяговим мережам [4-8].

ЗЕП дільниці Котовськ–Роздільна на нашу думку має зменшенну надійність за рахунок консольного живлення тягової підстанції Чубовка від підстанції 330 кВ Котовськ. Перетоки потужності по тяговій мережі 27,5 кВ будуть завжди, так як через тягову мережу з'єднується тупикова лінія 110 кВ від підстанції 330 кВ Котовськ та мережа 110 кВ, яка має живлення від МГРЕС та підстанції 110 кВ Комінтерн.

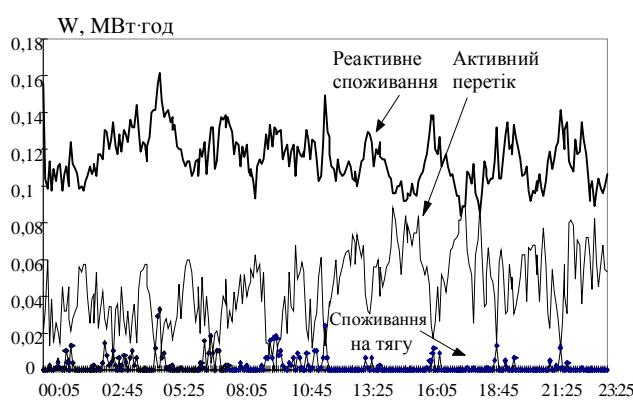


Рис. 1. Режими роботи електротягової мережі ЕПП-27,5 кВ:  
а) витрати електроенергії ТП Тернопіль за 28.03.98;  
б) витрати електроенергії підстанцій при різних схемах живлення за вересень-грудень 1998 р.

Проектні рішення ЗЕП Полтава–Красноград–Лозова враховують характеристики існуючого стану електричних мереж та потокорозподілу активної і реактивної потужності в мережах з урахуванням на-

вантажень тягових підстанцій в характерних режимах роботи (рис. 2). Навантаження тягових підстанцій забезпечують ЛЕП 110 кВ АК "Харківобленерго" та ПАТ "Полтаваобленерго", які мають живлення від

Північної ЕС НЕК "Укренерго". Таким чином при включені в роботу ТП Карловка великі перетоки потужності по тяговій мережі не прогнозуються.

ЗЕП дільниці Полтава–Кременчук–Бурти Південної залізниці на сьогодні не є задовільним. Використання пересувної тягової ПС 110/27,5/10 кВ, джерелом електропостачання якої є ПС 330/110/35/6 кВ "Полтава" забезпечує тільки III категорію надійності. Необхідно в найкоротший термін ввести в роботу пересувну тягову підстанцію 150/27,5/10 кВ "Кременчук тяг.", джерелом електропостачання якої є ПС 330 кВ "Кременчук" Північної ЕС НЕК "Укренерго" та встановити компенсиуючи пристрій на шинах ПС 150 кВ "Кременчук тяг." у відповідності з вимогами діючих директивних документів з проектування для забезпечення дотримання в точках спільногоприєднання різних споживачів рівнів напруги та якості електроенергії відповідно до ГОСТ 13109-97 "Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення", або обґрунтувати недоцільність їх встановлення.

**Аналіз проектних технічних рішень зовнішнього електропостачання тягових підстанцій Нової електрифікації залізниць на період 2011-2016 роки.** Відповідно до Національного плану дій на 2012 рік відносно впровадження Програми економічних реформ на 2010-2014 року "Спроможне суспільство, конкурентоздатна економіка, ефективна держава", затвердженого Указом Президента Україні від 12.03.2012 №187/2012 в розділі "розвиток транспортної інфраструктури" для залізничного транспорту передбачається виконання проектно-вишукувальних робіт і робочої документації для електрифікації наступних ділянок: Волновах–Камиш–Заря–Запоріжжя, Долинська–Миколаїв, Колосівка–Миколаїв.

Системоутворююча мережа 330 кВ району електропостачання тягових підстанцій на дільниці Волноваха–Камиш–Заря має конфігурацію двох кілець – північного та південного, які зв'язані між собою лінією 330 кВ Вуглегорська ТЕС – Макіївська – Чайкине (з резервуванням транзиту ПЛ 750 кВ Донбаська – П. Донбаська). Північне кільце має зв'язок з ПС 750 кВ Донбаська, південне – з ПС 750 кВ П. Донбаська. Картка-схема існуючої електричної мережі 110–750 кВ в південному районі Донецької області на період до 2015 р. наведена на рис. 3, а схема електричних з'єднань існуючої мережі 35–110 кВ Донецьких Західних ЕС ПАТ "Донецькобленерго" з урахуванням споруди тягових підстанцій в районі залізничної ділянки Волноваха–К. Заря Донецької залізниці – на рис. 4.

Електрифікація планується на постійному струмі напругою 3,3 кВ. Проектом передбачено побудову 4 тягових підстанцій загальною потужністю 18,7 МВт, в тому числі ТП Зачатьєвська – 4,3 МВт, ТП Хлебодарівка – 5 МВт, ТП Розовка – 5 МВт, ТП ОП 347 – 4,4 МВт. Джерелами електрозважевлення, які знаходяться в районі проходження дільниці Волноваха – К. Заря Донецької залізниці, є Кураховська ТЕС та Старобішевська ТЕС, а також підстанція 330/110 кВ Іванів-

ка. На підстанції 330/110 кВ Іванівка встановлено один автотрансформатор потужністю 200 МВА. ПС 330/110 кВ Іванівка зв'язана по мережі 330 кВ з Кураховською ТЕС лінією, яка виконана фазним проводом перерізом 2АС-400, довжиною 57 км, та з ПС 330/110 кВ Зоря (ПЛ 330 кВ виконана фазним проводом перерізом 2АС-400, довжина лінії – 59 км).

Для живлення тягових підстанцій та забезпечення електропостачання об'єктів залізниці передбачається збудувати ПС 110 кВ р-п Донецький, що належить ПАТ "Донецькобленерго" та ПС 330/110 кВ Іванівка, яка належить Донбаській енергосистемі НЕК "Укренерго".

У проекті для оцінки працездатності варіантів схеми ЗЕП виконані електричні розрахунки потокорозподілу активних і реактивних потужностей і рівнів напруги. Аналіз режимів роботи мереж 750 – 110 кВ, (надані Донбаською ЕС) в режимні дні 15.12.2010 р., 21.12.2011 р. показує, що переток по АТ 330/110 кВ ПС 330/110 кВ Іванівка складає 53/56 МВт, відповідно. Завантаження головної дільниці ПЛ 110 кВ Вуглеродар – Павлівка – р-п Донецький складає 11/8 МВт, відповідно. Напруга на шинах 110 кВ ПС 330/110 кВ Іванівка – 120/118 кВ, напруга на підстанції р-п Донецький на шинах 35 кВ – 38,5/ 39 кВ, на шинах 10 кВ – 10,6/10,6 кВ, відповідно.

Для літнього рівня навантажень нормальних режимів роботи мереж 750 – 110 кВ (надані Донбаською ЕС) в режимні дні 16.06.2010 р., 15.06.2011 р. перетоки через АТ 330/110 кВ на ПС 330/110 кВ Іванівка складає 30/52 МВт відповідно. Завантаження головної дільниці ПЛ 110 кВ Вуглеродар – Павлівка – р-п Донецький характеризується величиною 9,2/7,8 МВт відповідно. Напруга на шинах 110 кВ ПС 330/110 кВ Іванівка – 119/119 кВ, напруга на шинах підстанції р-п Донецький складає 38/38,5 кВ – на шинах 35 кВ, на шинах 10 кВ – 10,4/10,4 кВ відповідно.

Аналіз режимів роботи ЗЕП показав, що в нормальному і в усіх післяаварійних і ремонтно-аварійних режимах мережі рівні напруги, завантаження ліній електропередач і трансформаторів зв'язку знаходяться в межах нормованих значень. Таким чином можна зробити висновок про можливість енергоефективного приєднання нових тягових підстанцій. Сумарні укрупнені витрати в спорудження намічених тягових підстанцій для електрифікації ділянки Волноваха – К.Заря Донецької залізниці і реконструкції діючих мереж ПАТ "Донецькобленерго" і Донбасівською ЕС, приведені в табл. 1.

Вартість нового будівництва ліній електропередач прийнята згідно нормативного документа Міністерства енергетики та вугільної промисловості України "Укрупнені показники вартості будівництва підстанцій напругою від 6 кВ до 150 кВ та ліній електропередач напругою від 0,38 до 150 кВ. Норми" СОУ-НМЕВ 45.2-37471933- 44:20И із застосуванням індексів зміни вартості на період 01.07.2012.

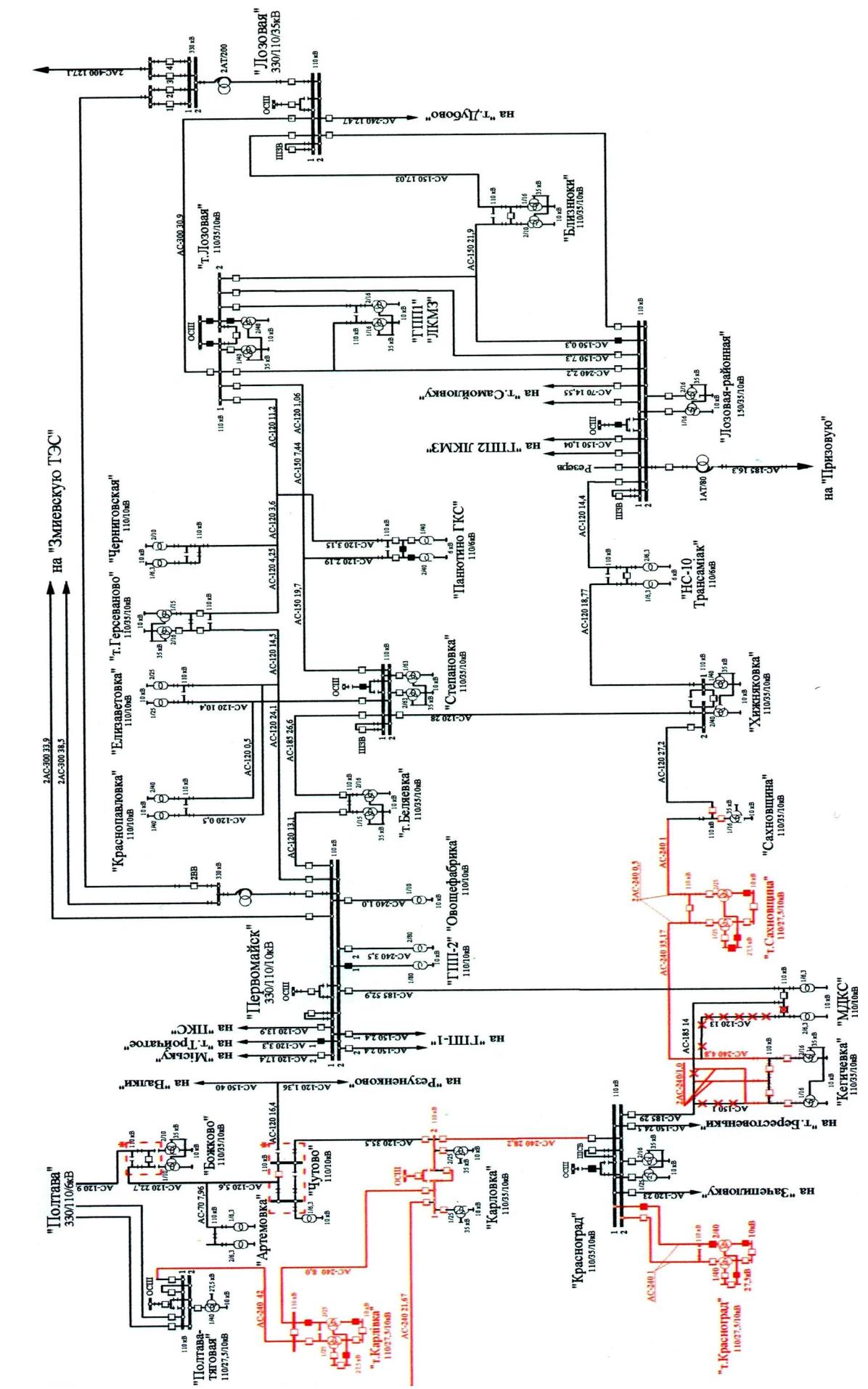


Рис. 2. Схема електрических з'єднань мереж 35 кВ та вище району електрифікуемої дільниці Полтава – Красноград – Лозова

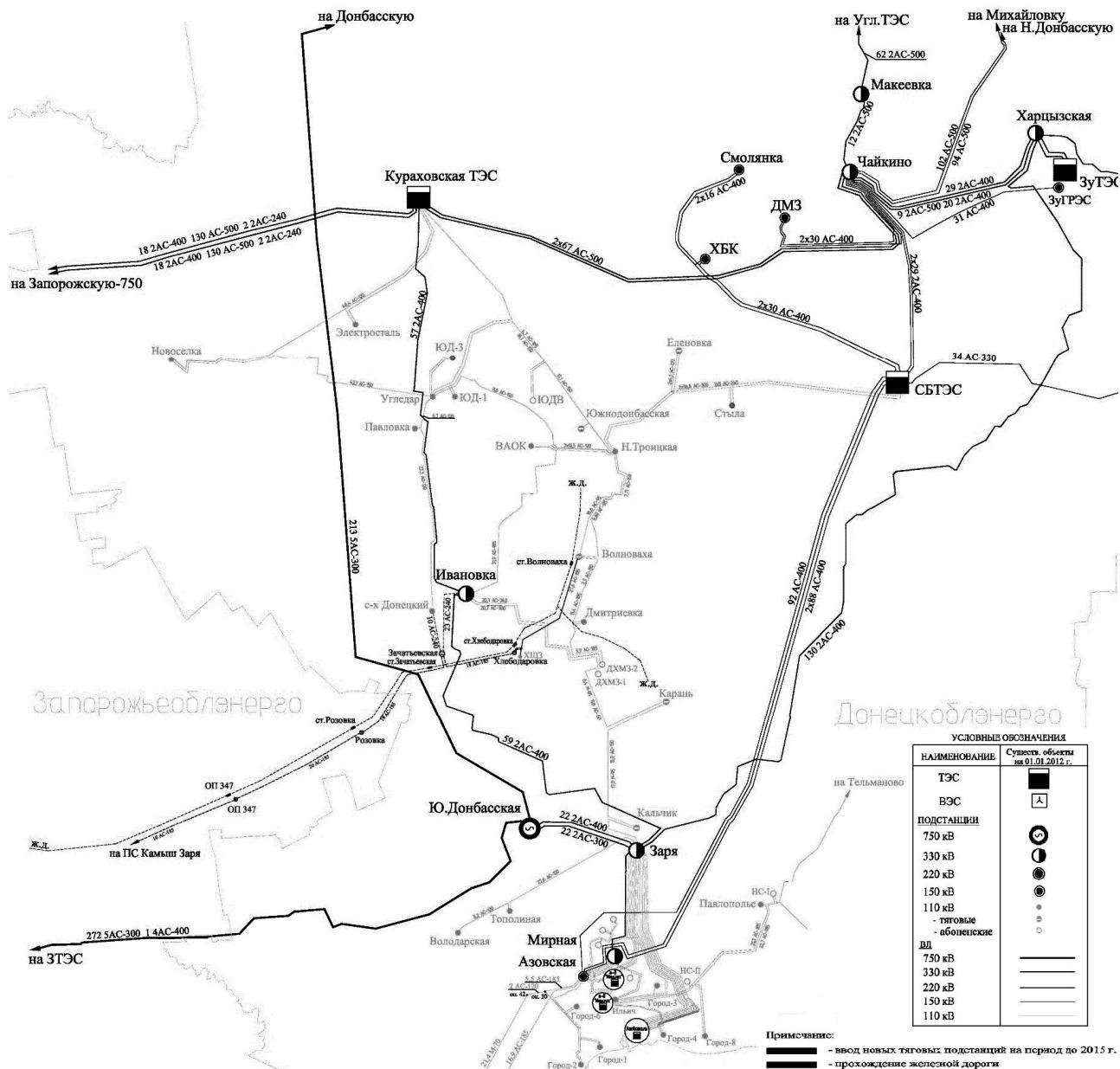


Рис. 3. Карта-схема електрических мереж 110-750 кВ в південному районі Донецької області на період до 2015 р.

Таблиця 1

Найменування	Варіант 1, тис. грн.	Варіант 2, тис. грн.	Варіант 3, тис. грн.
Спорудження об'єктів схеми ЗЕП, що належать Донецькій ж.д.	331436,192	493565,192	571252,423
Споруда і реконструкція об'єктів схеми ЗЕП, що належать Донецькій ЕС	2827,077	2827,077	2827,077
Споруда і реконструкція об'єктів схеми ЗЕП, що належать ПАТ "Донецькобленерго"	48081,231	59389,531	38908,30
<b>Всього по варіантах</b>	<b>382344,50</b>	<b>555781,80</b>	<b>612987,80</b>
Теж, в %	100%	145%	160%

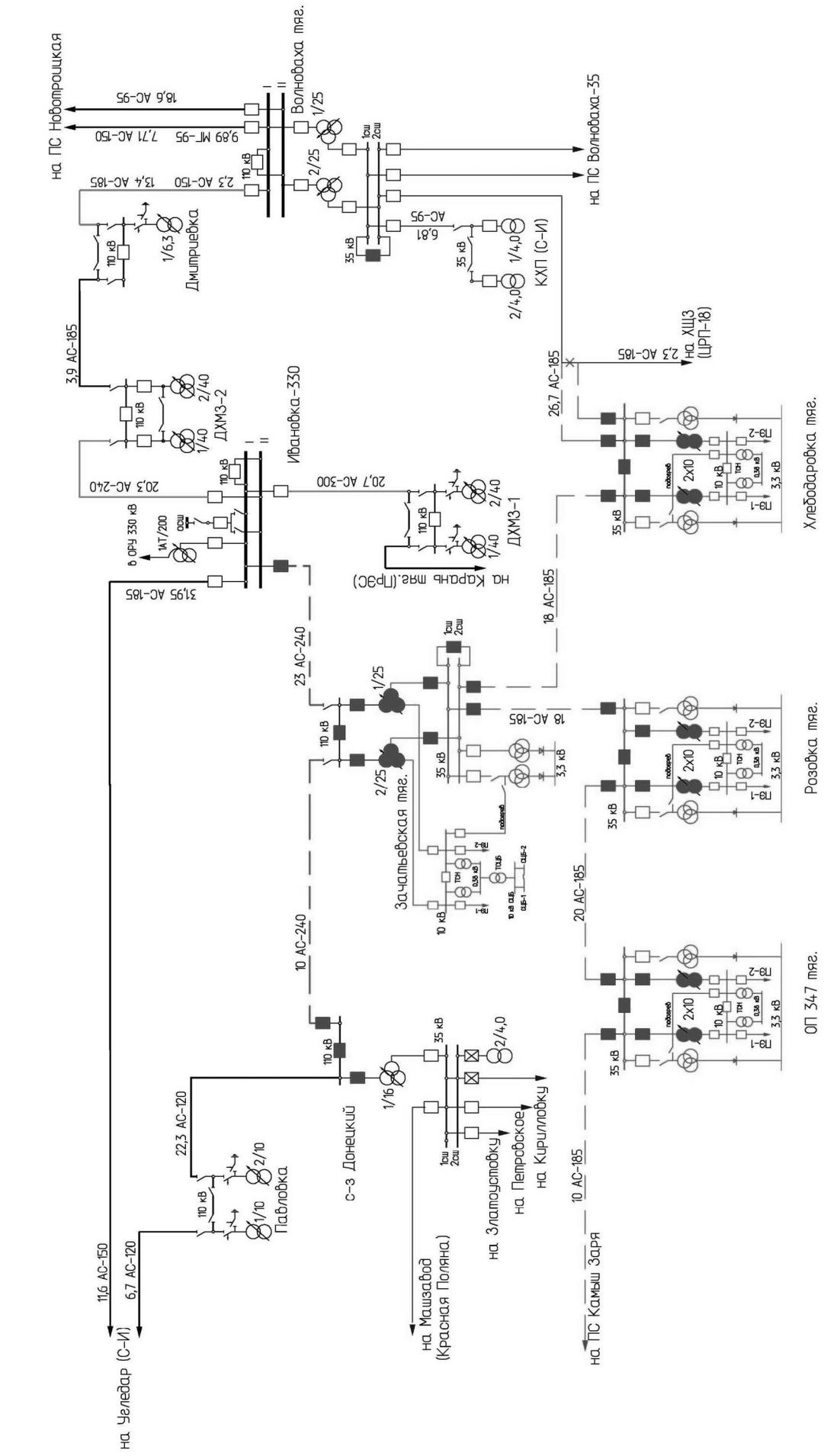


Рис. 4. Схема електричних з'єднань існуючої мережі 35-110 кВ Донецьких Західних ЕС ПАТ 'Донецькобленерго' з урахуванням споруд тягових підстанцій в районі запізничної ділянки Волноваха – К. Заря Донецької залізниці

— сооружение объектов тяговых подстанций

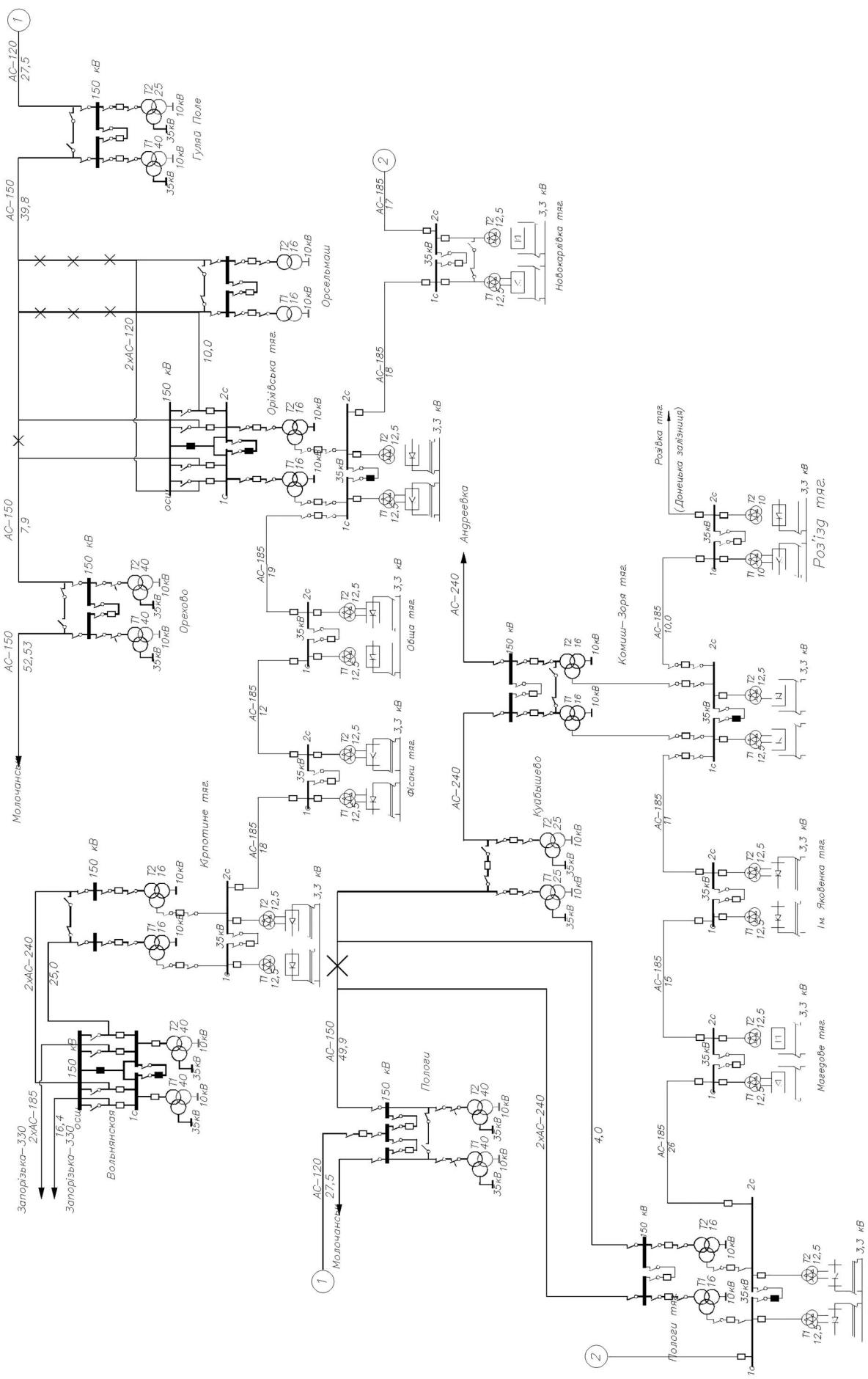


Рис. 5. Схема електрических з'єднань мережі 35 кВ та вище району електропідстанції Запорізької - Кочини-Зоря

Електрифікація ділянки залізниці Запоріжжя–Комиш-Зоря дозволить перевести на електротягу вантажні перевезення сировини з Кривого Рогу й Запоріжжя на металургійні підприємства Донецького регіону і Маріуполя та водночас на чверть збільшити пропускну спроможність самої ділянки Запоріжжя – Пологи – Комиш-Зоря. Електрифікація планується на напругу 3,3 кВ постійного струму. Сумарне навантаження нових дев'яти тягових підстанцій Придніпровської залізниці складає 44,6 МВт в тому числі: ТП Кірпотине – 6,4 МВт; ТП Фісаки – 4,8 МВт; ТП Обща – 2,7 МВт; ТП Оріхівська – 4,1 МВт; ТП Новокарлівка – 4,9 МВт; ТП Пологи – 6,7 МВт; ТП Магедове – 5,6 МВт; ТП ім. Яковенка – 4,8 МВт; ТП Комиш Зоря – 4,6 МВт.

Джерелами електропостачання району є підстанції 330 кВ "Дніпро-Донбас", "Запорізька", "Мелітопольська" та "Молочанська" Дніпровської ЕС НЕК "Укренерго". По всій довжині ПЛ 330 кВ (164 км), що пов'язує чотири зазначені підстанції змонтовано провід АС-300. При цьому довжина ПЛ 330 кВ "Молочанська – Мелітопольська" складає 62 км, "Дніпро - Донбас – Молочанська" – 94 км, "Запорізька 330 – Дніпро-Донбас" – 8 км. Згідно розробленої в НЕК "Укренерго" "Галузевої програми з реконструкції та модернізації магістральних та міждержавних електрических мереж на 2012-2016 рр." визначені вище ПЛ включені в програму модернізації та реконструкції в першу чергу.

На сьогодні чотири проходіні підстанції 150 кВ району проходження ділянки залізниці (Орехово, Орсьельмаш, Гуляй Поле, Пологи) живляться від одноколового транзиту загальною довжиною 186,56 км, що підключений до різних систем шин 150 кВ опорної підстанції 330/150/35 кВ "Молочанська". Це свідчить про необхідність приведення існуючої схеми електричної мережі у відповідність вимогам нормативних документів для забезпечення надійного електропостачання як існуючих споживачів району, так і перспективних об'єктів I категорії залізниці. За результатами електрических розрахунків для нових ПЛ 150 кВ вибрано провід типу АС-240 згідно п.2.5.86 ПУЕ, а для ПЛ 35 кВ - провід типу АС-185.

Згідно рекомендованого варіанту передбачається наступне приєднання тягових підстанцій до мереж енергосистем (рис. 5):

- "Кірпотине тяг." на напругу 150 кВ з підключенням двома відгалуженнями від існуючої двоколової тупикової ПЛ 150 кВ Запорізька-330 – Вольнянська (Л-411, Л-412), що є лінією живлення підстанції 150/35/10 кВ "Вольнянська";

- "Фісаки тяг." на напругу 35 кВ з організацією РП 35 кВ за схемою 35-5 "одна робоча, секціонована вимикачем, система шин". Живлення "Фісаки тяг." передбачається одноколовою повітряною лінією від шин 35 кВ нової підстанції "Кірпотине тяг." та одноколовою повітряною лінією від шин 35 кВ нової підстанції "Обща тяг.>";

- "Обща тяг." на напругу 35 кВ з організацією РП 35 кВ за схемою 35-5 "одна робоча, секціонована вимикачем, система шин" з живленням "Обща тяг." двома одноколовими повітряними лініями 35 кВ від нової підстанції "Фісаки тяг." та від ЗРП 35 кВ нової

ПС 150/35 кВ "Оріхівська тяг.";

- "Оріхівська тяг." на напругу 150 кВ і забезпечення її живлення за схемою "захід-вихід" від існуючої ПЛ 150 кВ "Орехово-Орсьельмаш" (Л-451). Приєднання тягової підстанції за такою схемою можливе лише у разі зміни схеми живлення абонентської підстанції 150/10 кВ "Орсьельмаш";

- "Новокарлівка тяг." на напругу 35 кВ і забезпечення її живлення двома одноколовими повітряними лініями 35 кВ: від РП 35 кВ нової ПС "Оріхівська тяг." і від РП 35 кВ нової ПС "Пологи тяг.";

- "Пологи тяг." на напругу 150 кВ і забезпечити її живлення за схемою "захід-вихід" від існуючої повітряної лінії 150 кВ "Пологи-Куйбишево";

- "Магедове тяг." на напругу 35 кВ з організацією РП 35 кВ за схемою 35-5 "одна робоча, секціонована вимикачем, система шин". Згідно з живлення "Магедове тяг." двома ПЛ 35 кВ: від нової ПС 35 кВ "Пологи тяг." та від нової ПС 35 кВ "ім. Яковенка тяг.";

- "Комиш-Зоря тяг." на напругу 150 кВ і забезпечити її живлення одноколовою повітряною лінією від існуючої ПС "Андреївка" та одноколовою ПЛ від існуючої ПС "Куйбишево".

Живлення підстанції 35 кВ "Фісаки тяг.", "Обща тяг.", "Новокарлівка тяг." та "ім. Яковенка тяг." передбачається по мережі 35 кВ від нових підстанцій 150 (35) кВ "Кірпотине тяг.", 150 (35) кВ "Оріхівська тяг.", 150 (35) кВ "Пологи тяг." та 150 кВ "Комиш-Зоря тяг."

Доцільність живлення тягових підстанцій "Кірпотине тяг.", "Оріхівська тяг.", "Пологи тяг." та "Комиш – Зоря тяг." по мережі 150 кВ, у зв'язку з необхідністю забезпечення I категорії надійності підтверджена електричними розрахунками при максимальних літніх та зимових навантаженнях 2011 року з урахуванням приєднанням тягових підстанцій. Усі виконані розрахунки після аварійних режимів з урахуванням введення ПЛ 150 кВ "Кірпотине тяг. – Оріхівська тяг." характеризуються допустимими режимними параметрами.

На підставі аналізу виконаних розрахунків установлені електрическі режими можна зробити висновки:

- організувати надійне живлення нових тягових підстанцій, без додаткового розвитку мережі 150 кВ району неможливо;

- враховуючи навантаження тягових підстанцій, а також приєднання споживачів району, визначений ВАТ "Запоріжжябленерго", для компенсації дефіциту реактивної потужності у районі потрібно відновлення роботи пристройів компенсації реактивної потужності типу БСК (або введення нових ПКРП) на існуючих підстанціях 150 кВ в обсязі 30 – 40 Мвар.

У даному варіанті передбачається виконання ЗРП 150 кВ нової підстанції "Оріхівська тяг." за схемою 150-6 "одна робоча, секціонована вимикачем, і обхідна системи шин", ЗРП 150 кВ нових підстанцій "Пологи тяг." і "Комиш-Зоря тяг." – за схемою 150-4 "місток з вимикачами в колах трансформаторів і ремонтною перемичкою з боку трансформаторів". Схеми ЗРП 35 кВ усіх нових підстанцій 150/35 кВ та 35 кВ передбачається виконати за схемою 35-5 "одна робоча, секціонована вимикачем система шин".

Схема виконання ЗРП 150 кВ "Кірпотине тяг." за-

лежить від реалізації спорудження ПЛ 150 кВ "Кірпотине тяг. – Оріхівська тяг.". У разі спорудження цієї ПЛ необхідно передбачити ЗРП за схемою 150-6 "одна робоча, секціонована вимикачем, і обхідна системи шин".

Незалежно від прийнятого до реалізації варіанта ЗЕП тягових підстанцій ділянки "Запоріжжя - Комиш-Зоря", для забезпечення надійного електропостачання району та споживачів I категорії залізниці необхідно виконати реконструкцію ЗРП 150 кВ вузлової підстанції 150/35/10 кВ "Пологи" з приведенням до схеми 150-6 "одна робоча, секціонована вимикачем, і обхідна системи шин".

Аналіз режимів аварійної ситуації за умови одночасного відключення ПЛ 150 кВ "Молочанська – Орехово" (Л-112) та "Молочанська – Пологи" (Л-113) призводить до недопустимого зниження напруги в електричній мережі району, навіть у режимі мінімальних навантаженнях літа, що потребує введення значного обсягу обмеження споживачів регіону для підтримки напруги у допустимих межах.

Для забезпечення надійності електропостачання споживачів I категорії залізниці передбачено спорудження ПЛ 150 кВ "Андреївка – Комиш – Зоря тяг. – Куйбишево". Проте, основним джерелом живлення ПС "Андреївка", як і інших підстанцій району, залишаються шини 150 кВ опорної ПС 330/150 кВ "Молочанська".

Беручи до уваги вищезазначене, вважається за доцільне додатково приєднати електричну мережу району до іншого джерела живлення, а саме, до шин 150 кВ підстанції 330 кВ "Запорізька". З цією метою пропонується спорудити ПЛ 150 кВ від нової ПС "Кірпотине тяг." до нової ПС "Оріхівська тяг." орієнтовно довжиною 53,6 км, тобто утворити транзит 150 кВ "Запорізька – Вольнянська – Кірпотине тяг. – Оріхівська тяг.".

Аналіз розрахунків режимів на перспективний період (2016 р. і 2021 р.) свідчить про необхідність відновлення роботи БСК, які встановлені на існуючих ПС 150 кВ "Гуляй Поле", "Пологи" і "Куйбишево", але у даний час виведені з експлуатації. Введення в роботу існуючих або нових пристрій компенсації реактивної потужності величиною 30-40 Мвар потрібне для підтримки напруги в електричній мережі у зв'язку з прогнозованим ростом навантажень району. Виконаний комплекс розрахунків ремонтних (аварійних) режимів на перспективний період з урахуванням вищезазначених заходів показав, що струмове завантаження АТ, трансформаторів, ліній електропередач, а також рівні напруги в електричній мережі району знаходяться в межах допустимих значень.

Вартість робіт з реконструкції існуючих електрических мереж та нового будівництва з метою реалізації ЗЕП складає орієнтовно 262,05 млн. грн. Орієнтовна вартість робіт із спорудження ПЛ 150 кВ "Кірпотине тяг. – Оріхівська тяг." складає 64,3 млн. грн.

Створення другого електрифікованого ходу на південь в Крим і порти Чорного моря дуже важливо для економіки країни. На цьому напрямі планується використання найбільш сучасних технологій електропостачання –транспортно-енергетичних коридорів в полосі відчуження залізниць, що ефективно при спорудженні нових залізничних ліній в енергодефіцитних регіонах. З метою виконання вимог концепції схем-

них рішень ЗЕП тягових підстанцій найбільш ефективним є варіант приєднання тягових підстанцій "Херсон-тягова" та "Миколаїв-тягова" до ПС 330 кВ "Херсон" та "Миколаїв" відповідно за схемою: Миколаїв – Миколаїв-тягова – Херсон-тягова – Херсон.

При цьому варіанті врахована наступна інформація:

- ПС "Херсон-тягова", максимальне розрахункове навантаження якої складає 14,7 МВт, споруджується поблизу міста Херсон для електрифікації дільниці Миколаїв – Херсон Одеської залізниці. Введення навантаження підстанції передбачається до 2014 року;

- ПС "Миколаїв-тягова", розрахункове навантаження якої складає 19 МВт, споруджується у південній частині м. Миколаїв, введення навантаження підстанції планується в 2012 році;

Загальна протяжність транзиту 150 кВ Херсон – Херсон-тягова – Миколаїв-тягова – Миколаїв становить 119 км. Схема приєднання підстанцій наведена на рис. 6. Розрахунок нормальних та післяаварійних режимів роботи мережі регіону з урахуванням навантаження тягових підстанцій у період максимальних зимових навантажень 2015 року показує, що в аварійних режимах при відключенні двох АТ 330 кВ на ПС "Херсон" та двох АТ 330 кВ на ПС "Миколаїв" з метою підтримання допустимих рівнів напруги на ПС 150 кВ регіону виникає необхідність встановлення пристрій компенсації реактивної потужності. Слід зазначити, що зниження напруги на ПС "Миколаїв-тягова" не є значимим завдяки спорудженню лінії Херсон–Херсон-тягова у дволанцюговому виконанні.

Рекомендований варіант схеми ЗЕП ПС Херсон-тягова та Миколаїв-тягова Одеської залізниці показав, що з метою підтримання допустимих рівнів напруги на ПС 150 кВ регіону в аварійних режимах (подвійні відключення АТ 330 кВ на ПС "Херсон" та ПС "Миколаїв") виникає необхідність встановлення пристрій компенсації реактивної потужності. Аналіз розрахункових струмів короткого замикання на шинах 150 кВ тягових підстанцій показав, що струм трифазного к.з. на ПС "Херсон-тягова" складає 9,5 кА, а на ПС "Миколаїв-тягова" – 5,5 кА. Капіталовкладення реалізації схеми зовнішнього електропостачання тягових підстанцій складають 267,4 млн. грн. для відкритої підстанції та 307,4 млн. грн. для закритої підстанції.

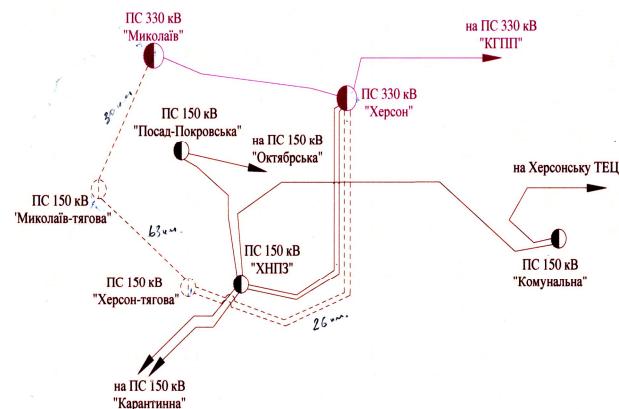


Рис. 6. Схема приєднання ПС "Херсон-тягова" та "Миколаїв-тягова"

## ВИСНОВКИ

Стратегія розвитку схем зовнішнього електропостачання тягових підстанцій з урахуванням вимог електроенергетики України базується на приєднанні до мереж НЕК Укренерго (220-330 кВ) з метою підвищення якості електроенергії і зниження витрат і часу будівництва нових тягових підстанцій та підвищенні надійності і безпеки електропостачання тягових підстанцій шляхом розвитку власних живлячих електрических мереж 110 кВ і створення транспортно-енергетичних коридорів в полосі відчуження залізниць, що ефективно при спорудженні нових залізничних ліній в енергодефіцитних регіонах. Нові підходи схемо-технічних рішень приєднання тягових підстанцій до мереж енергосистем вимагають розгляду наступних питань:

- аналіз звітних режимів роботи мереж 110-35 кВ в районі розташування тягових підстанцій з метою складання балансів активної та реактивної потужності;
- прогноз енергетичних показників на період до 2020 р. з метою оцінки балансів активної та реактивної потужності регіону;
- характеристика існуючого стану електрических мереж 110-35 кВ, виявлення "вузьких" місць і ступеня надійності електrozабезпечення споживачів;
- розробка можливих варіантів приєднання тягових підстанцій з розбивкою по черговості будівництва;
- розробка та аналіз електрических розрахунків по потокорозподілу в мережах 35, 110 кВ з урахуванням навантажень тягових підстанцій в характерних режимах роботи (зима, максимум і літо, мінімум навантаження);
- розрахунки струмів короткого замикання на шинах живлячої напруги нових тягових підстанцій для вибору комутаційного обладнання;
- оцінка обсягів реконструкції і нового будівництва для розроблення варіантів схем зовнішнього електропостачання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Корниенко В.В., Котельников А.В., Доманский В.Т. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор). – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
3. Доманский В.Т., Корниенко В.В., Котельников А.В. Энергетическая безопасность железных дорог и стратегия их развития // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 6. – С.5-9.

4. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 456 с.
5. Доманский В.Т., Андреевских А.В., Доманская Г.А. Расчет системы электроснабжения участков разных номинальных напряжений // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – №2. – С. 19-23.
6. Корниенко В.В., Доманская Г.А. Методы расчета и моделирования режимов работы систем тягового электроснабжения и питающих их энергосистем// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 5/3 (29). – С. 31-37.
7. Доманская Г.А. Оценка перетоков мощности и выбор энергосберегающих схем питания // Вісник НТУ "ХПІ". – 2007. – № 37. – С. 106-110.
8. Vennegeerts H. Параллельная прокладка высоковольтных трехфазных тяговых линий // Elektrische Bahnen. – 2003. №4. -- С. 100-104.

**Bibliography (transliterated):** 1. Markvard K.G. 'Elektrosnabzhenie `elektrifitsirovannyh zheleznyh dorog. - M.: Transport, 1982. - 528 s. 2. Kornienko V.V., Kotel'nikov A.V., Domanskij V.T. 'Elektrifikaciya zheleznyh dorog. Mirovye tendencii i perspektivy (Analiticheskij obzor). - K.: Transport Ukrainsky, 2004. - 196 s. 3. Domanskij V.T., Kornienko V.V., Kotel'nikov A.V. 'Energeticheskaya bezopasnost' zheleznyh dorog i strategiya ih razvitiya // Zaliznichniy transport Ukrainski. - 2010. - № 6. - S.5-9. 4. 'Elektro' energeticheskie sistemy v primerah i illyustraciyah / Pod red. V.A. Venikova. - M.: 'Energoatomizdat, 1983. - 456 s. 5. Domanskij V.T., Andreevskih A.V., Domanskaya G.A. Raschet sistemy `elektrosnabzheniya uchastkov raznyh nominal'nyh napryazhenij // Vestnik VNIIZhT. - 1990. - №2. - S. 19-23. 6. Kornienko V.V., Domanskaya G.A. Metody rascheta i modelirovaniya rezhimov raboty sistem tyagovogo `elektrosnabzheniya i pitayuschih ih `energosistem// Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. - 2007. - № 5/3 (29). - S. 31-37. 7. Doman'skaya G.A. Ocenna peretokov moschnosti i vybor `energosberegayushchih shem pitanija // Visnik NTU "HPI". - 2007. - № 37. - S. 106-110. 8. Vennegeerts H. Parallel'naya prokladka vysokovol'tnyh trehfaznyh tyagovyh linij // Elektrische Bahnen. - 2003. №4. -- S. 100-104.

Доманський Ілля Валерійович, к.т.н., доц.

Національний технічний університет

"Харківський політехнічний інститут"

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ",

кафедра "Електричний транспорт та тепловозобудування"

Domansky I.V.

**System analysis of external power supply of railways traction substation.**

A system analysis of external power supply circuits of railways traction substations over the period of 1993 through 2011 and power supply circuits projects up to 2016 in the market economy environment and under standard requirements of the power industry of Ukraine is conducted.

**Key words – external power supply, traction substation, modes of the grid operation, analysis.**

## АППРОКСИМАЦІЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЇ МОДЕЛІ ЭЛЕКТРОАМОРТИЗАТОРА

*В роботі представлена структура визначення апроксимуючого полінома, що дозволяє ідентифікувати потокозцеплення та електромагнітну силу математичної моделі електроамортізатора.*

*В работе представлена структура определения аппроксимирующего полинома, позволяющего идентифицировать потокосцепление и электромагнитную силу математической модели электроамортизатора.*

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ І ПУБЛІКАЦІЙ

Современные электромеханические преобразователи энергии стремятся создавать с максимальным использованием активных материалов. Это стремление приводит к созданию высокоиспользуемых устройств, в которых электромагнитные параметры характеризуются значительными нелинейностями системы. К таким типам электромеханических преобразователей относится электроамортизатор, конструкция которого приведена в работе [1].

Для моделирования режимов работы электроамортизатора была предложена математическая модель, созданная на основе уравнений Лагранжа для электромеханической системы. Модель, приведенная в работе [2], позволяет учесть нелинейность участков магнитной цепи электроамортизатора. Для идентификации параметров линейного электромеханического преобразователя (ЭМП) – электроамортизатора транспортного средства предлагается использовать метод конечных элементов, который позволяет, задав конструктивные, электрические и магнитные параметры, получить показатели потокосцепления и электромеханической силы [3]. Определение расчетных показателей модели для принятого варианта исходных данных, с учетом основных факторов, может составлять 5-7 дней с использованием современных компьютеров. Выполненные расчеты с использованием МКЭ позволяют получить цифровую модель магнитного поля линейного ЭМП-амортизатора. Однако результаты данной модели дискретны. Для получения непрерывных зависимостей, идентифицирующих параметры математической модели, необходимо аппроксимировать дискретные зависимости непрерывными функциями.

### ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определение непрерывных зависимостей потокосцеплений и электромагнитной силы электроамортизатора линейного типа транспортного средства с использованием полиномов Чебышева.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Математическая модель электроамортизатора, состоящая из уравнений электрического и механического равновесия представленная в работе [2], имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{D_A}{D}; \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{D_B}{D}; \\ \frac{di_3}{dt} = \frac{D_C}{D}; \\ F_e - \alpha v - F_C = m_{np} \frac{dv}{dt}; \\ v = \frac{dx}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} D &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \\ &\quad - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \cdot \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \cdot \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ D_A &= \left[ e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - \eta_1 i_1 \right] \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} \left[ e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] + \\ &\quad + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \left[ e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \left[ e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] - \\ &\quad - \left[ e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - \eta_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \left[ e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ D_B &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \left[ e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} + \left[ e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - \eta_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} + \\ &\quad + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \left[ e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} \left[ e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \\ &\quad - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} \left[ e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] - \left[ e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - \eta_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3}; \\ D_C &= \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \left[ e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right] + \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \left[ e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} + \\ &\quad + \left[ e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - \eta_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \left[ e_1 - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} \cdot v - \eta_1 i_1 \right] \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} - \\ &\quad - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} \left[ e_2 - \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} \cdot v - r_2 i_2 \right] \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} \left[ e_3 - \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} \cdot v - r_3 i_3 \right]; \\ \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_1} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_1} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial^2 i_1} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial^2 i_1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_2} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi_A(i_1, 0, i_3, x)}{\partial i_2} + \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi_B(0, i_2, i_3, x)}{\partial i_1} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial i_1 \partial i_2}; \\ \frac{\partial \Psi'_A}{\partial i_3} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi_A(i_1, i_2, 0, x)}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi_C(0, i_2, i_3, x)}{\partial i_1} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial i_1 \partial i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_1} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi_A(i_1, 0, i_3, x)}{\partial i_2} + \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi_B(0, i_2, i_3, x)}{\partial i_1} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial i_1 \partial i_2}; \\ \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_2} &= \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_2} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial^2 i_2} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial^2 i_2}; \\ \frac{\partial \Psi'_B}{\partial i_3} &= \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi_B(i_1, i_2, 0, x)}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi_C(i_1, 0, i_3, x)}{\partial i_2} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_1} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi_A(i_1, i_2, 0, x)}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_1} - \frac{\partial \Psi_C(0, i_2, i_3, x)}{\partial i_1} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial i_1 \partial i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_2} &= \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_3} - \frac{\partial \Psi_B(i_1, i_2, 0, x)}{\partial i_3} + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_2} - \frac{\partial \Psi_C(i_1, 0, i_3, x)}{\partial i_2} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_C}{\partial i_3} &= \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_3} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial^2 i_3} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial^2 i_3}; \\ \frac{\partial \Psi'_A}{\partial x} &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial x} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial i_1 \partial x} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial i_1 \partial x}; \\ \frac{\partial \Psi'_B}{\partial x} &= \frac{\partial \Psi_B}{\partial x} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial x} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_3} \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) di_3 \right]^2}{\partial i_2 \partial x}; \\ \frac{\partial \Psi'_C}{\partial x} &= \frac{\partial \Psi_C}{\partial x} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_1} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_3 \partial x} + \frac{\partial \left[ \int_0^{i_2} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) di_2 \right]^2}{\partial i_3 \partial x}. \end{aligned}$$

При выборе типа аппроксимирующих функций преследовались следующие задачи:

– функция должна иметь вид, позволяющий аналитически определять первые и вторые частные производные по всем координатам;

– функция и ее производные по перемещению ротора в начале и конце интервала, на котором производится аппроксимация (полюсное деление ВИМ), должны быть одинаковыми;

– зависимость предлагаемой функции должна учитывать изменения токов не только собственной, но и соседних фаз.

Учитывая вышесказанное, предложено: общий вид полиномов, которые описывают функции потокосцеплений фаз А, В и С, используем следующего вида:

$$\begin{aligned} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n aa_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ab_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right) \sin(\omega l x) \right] + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ac_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_B(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ba_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n bb_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right) \sin(\omega l x) \right] + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n bc_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k; \\ \Psi_C(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ca_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n cb_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right) \sin(\omega l x) \right] + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n cc_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $aa_{ijk}$ ,  $ab_{ijk}$ ,  $ac_{ijk}$ ,  $ba_{ijk}$ ,  $bb_{ijk}$ ,  $ca_{ijk}$ ,  $cb_{ijk}$ ,  $cc_{ijk}$  – коэффициенты полиномов для фаз 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.

Полином, описывающий электромагнитный силу ЭМП-амортизатора, имеет вид:

$$F_e(i_1, i_2, i_3, x) = \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ma_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right) \times \right. \\ \left. \times \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n mb_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k \right) \sin(\omega l x) \right] + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n mc_{ijk} \cdot i_1^i \cdot i_2^j \cdot i_3^k, \quad (3)$$

где  $ma_{ijk}$ ,  $mb_{ijk}$ ,  $mc_{ijk}$  – коэффициенты полинома, определенные по методу Чебышева.

Стандартные алгоритмы аппроксимации полиномами Чебышева используют нормализованную шкалу ординат, поэтому для приведения реальных токов к нормализованным, введены масштабные коэффициенты и смещения  $M$  и  $Z$ . В результате получим для фазы А (записи уравнений для фаз В и С аналогичны):

$$\begin{aligned} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) &= w \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n aa_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ab_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \right] \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_e(i_1, i_2, i_3, x) &= \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ma_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n mb_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

$$\times \sin(\omega l x) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n ac_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k.$$

Для определения коэффициентов аппроксимирующего полинома предлагается использовать метод на основе полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек [4, 6].

В уравнениях системы (1) необходимо интегрировать и дифференцировать функции потокосцепления (полином (4)) 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. Для всех возможных вариантов частных производных, входящих в математическую модель (1), получаем следующие выражения:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial i_2} \frac{\left[ \int_0^h \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial i_3} = \\ & = w \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \cos(\omega l x) + \right. \\ & \left. + \left( \sum_{i=0, l=1}^n \sum_{j=1, l=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \sin(\omega l x) \right] \\ & + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{i \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial i_2} \frac{\left[ \int_0^h \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial^2 i_2} = \\ & = w \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=2k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j(j-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \cos(\omega l x) + \right. \\ & \left. + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=2k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j(j-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-2} (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) \right] \\ & + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=2k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j(j-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-2} (i_3 M + Z)^k; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial i_2} \frac{\left[ \int_0^h \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial^2 i_3} = \\ & = w \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=2}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{k(k-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-2} \right) \cos(\omega l x) + \right. \\ & \left. + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=2}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{k(k-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-2} \right) \sin(\omega l x) \right] \\ & + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=2}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{k(k-1)}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-2}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_1} = w \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \left( M \cdot aa_{ijk} i (i_1 M + Z)^{i-1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \cos(\omega l x) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \left( M \cdot aa_{ijk} i (i_1 M + Z)^{i-1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) \right] + \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_2} = w \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \left( M \cdot aa_{ijk} j (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \cos(\omega l x) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \left( M \cdot aa_{ijk} j (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) \right] + \\ & + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \left( M \cdot aa_{ijk} j (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_3} = w \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \left( M \cdot aa_{ijk} k (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \cos(\omega l x) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \left( M \cdot aa_{ijk} k (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \sin(\omega l x) \right] + \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & + w \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \left( M \cdot aa_{ijk} k (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \\ & \frac{\partial}{\partial i_2} \frac{\left[ \int_0^h \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial x} = \\ & = w \sum_{l=1}^m \left[ -\omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=0}^n \left( aa_{ijk} \frac{j}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) + \right. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \left. + \omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=0}^n \left( aa_{ijk} \frac{j}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^k \right) \cos(\omega l x) \right]; \\ & \frac{\partial}{\partial i_3} \frac{\left[ \int_0^h \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_3 \partial x} = \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & = w \sum_{l=1}^m \left[ -\omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \left( aa_{ijk} \frac{k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \sin(\omega l x) + \right. \\ & \left. + \omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0k=1}^n \left( aa_{ijk} \frac{k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^{k-1} \right) \cos(\omega l x) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Psi_A}{\partial x} = w \sum_{l=1}^m \left[ -\omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \left( aa_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \sin(\omega l x) + \right. \\ & \left. + \omega l \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=0}^n \left( aa_{ijk} (i_1 M + Z)^i (i_2 M + Z)^j (i_3 M + Z)^k \right) \cos(\omega l x) \right]; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial i_2} \frac{\left[ \int_0^{i_{A(B,C)}} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial i_3} = \\ & = w \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=1}^n \left( M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} \times \right. \right. \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \times (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1}) \cos(\omega l x) + \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} \times \right. \\ & \times (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1}) \sin(\omega l x) \left. \right] + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1k=1}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j \cdot k}{i+1} \times \\ & (i_1 M + Z)^{i+1} (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_1} = w \sum_{l=1}^m \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \left( M \cdot aa_{ijk} \cdot i \cdot (i_1 M + Z)^{i-1} \times (i_2 M + Z)^{j-0} (i_3 M + Z)^{k-0} \right) \cos(\omega l x) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n \left( M \cdot aa_{ijk} \cdot i \cdot (i_1 M + Z)^{i-1} \times (i_2 M + Z)^{j-0} (i_3 M + Z)^{k-0} \right) \sin(\omega l x) \right] + \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \cdot i \times (i_1 M + Z)^{i-1} (i_2 M + Z)^{j-0} (i_3 M + Z)^{k-0}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial i_2} \frac{\left[ \int_0^{i_{A(B,C)}} \Psi_A(i_1, i_2, i_3, x) di_1 \right]^2}{\partial i_2 \partial \gamma} = \\ & = \sum_{l=1}^m \left[ -\omega l \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n aa_{ijk} \frac{j}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} \times \right. \right. \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \times (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-0} \right) \sin(\omega l x) + \omega l \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=0k=0}^n M \cdot aa_{ijk} \frac{j}{i+1} (i_1 M + Z)^{i+1} \times \right. \\ & \left. \times (i_2 M + Z)^{j-1} (i_3 M + Z)^{k-0} \right) \cos(\omega l x) \right] \end{aligned}$$

Для определения порядка регрессионной модели, описывающей цифровой эксперимент, предлагается оценить результаты аппроксимации и сравнить их с результатами эксперимента по критерию минимума максимального отклонения. На рис. 1, 2 приведены результаты расчета максимального отклонения аппроксимирующих полиномов для потокосцеплений фаз и электромагнитной силы ЭМП.

Для определения рационального значения степени аппроксимирующих полиномов проведен комплекс цифровых экспериментов, в ходе которых были установлены величины максимального отклонения полученных полиномиальных зависимостей.

Анализ результатов расчета показал следующее, что для обеспечения максимального отклонения в пределах 3-4 % достаточно использовать полиномы 3 степени по току соответствующей фазы ( $n = 3$ ), при числе гармоник  $m = 3$ . Результаты сопоставления расчетных значений по модели и вычисленных с помощью полинома Чебышева представлены на рис. 1.

Зависимость изменения  $\Psi$  представлена от перемещения  $x$  ротора, при токах в фазах (-560A, -420 A, -420A) и при токах в фазах (560A, 420 A, 420A).

Величина среднеквадратического отклонения не превышает 2 % (1,61 %).

Описание полиномом изменения силы  $F_e$  ЭМП-амортизатора при принятых параметрах [2] показало, что для обеспечения минимума максимального отклонения менее 4-5 % необходимо степени полинома  $n = 3$ , а число гармоник  $m = 27$ . Фрагмент сопоставляемых результатов приведен на рис. 2.

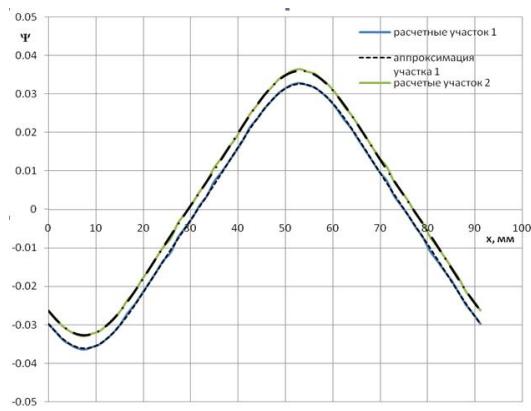


Рис. 1. Результаты расчета и аппроксимации потокосцепления в зависимости от перемещения ротора:  
нижние кривые (при токах -560А, -420 А, -420А);  
верхние кривые (при токах 560 А, 420А, 420 А)

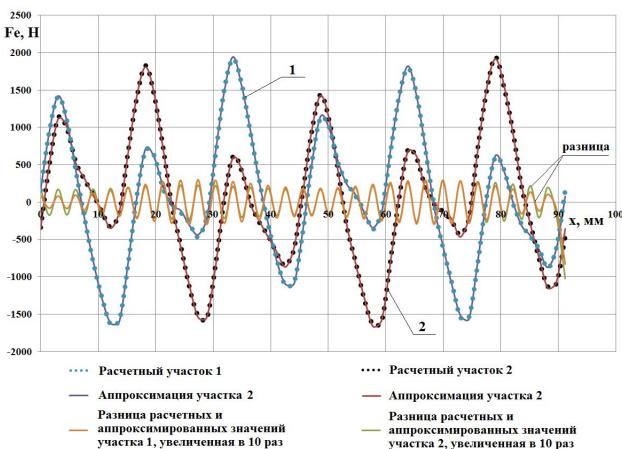


Рис. 2. Результаты расчета и аппроксимации силы  $F_e$  ЭМП  
в зависимости от перемещения ротора: нижние кривые  
в начальный момент (при токах -560А, -420 А, -420А);  
верхние кривые в начальный момент  
(при токах 560 А, 420А, 420 А)

## ВЫВОДЫ

Предложена структура аппроксимирующего полинома, позволяющего получить непрерывные зависимости для идентификации параметров математической модели электроамортизатора.

Определены параметры аналитических зависимостей потокосцеплений и электромагнитной силы математической модели электроамортизатора, приведенной в работе [2].

Выбраны рациональные значения степеней и число гармоник аппроксимирующих полиномов по критерию минимального отклонения, полученных по результатам цифрового моделирования ЭМП-амортизатора. Установлено, что степень полинома как для потокосцеплений, так и для электромагнитной силы достаточно  $n = 3$ , а число гармоник для потокосцеплений фаз достаточно  $m = 3$ , для электромагнитной силы  $m = 27$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сергиенко А.Н. Анализ конструкций электромеханических преобразователей и выбор схемы электроамортизатора неподпрессоренных масс транспортного средства / А.Н. Сергиенко, Б.Г. Любарский, Н.Е. Сергиенко и др. // Автомобильный транспорт. – Харьков: Изд-во ХНАДУ / Сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 31.
- Сергиенко А.Н. Математическая модель электромеханического преобразователя для электроамортизатора транспортного средства / А.Н. Сергиенко, Б.Г. Любарский, Н.Е. Сергиенко // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 61-65.
- Режим доступа: <http://femm.berlios.de>.
- Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
- Сергиенко А. Н. Оценка показателей электро-амортизатора неподпрессоренных масс транспортного средства / Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. Серія: Автомобіль- та тракторобудування. – №60 (966). – 2012. – С. 120-126.
- Данилов Ю.А. Многочлены Чебышева. – Мн.: Выш. шк., 1984. – 157 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Sergienko A.N. Analiz konstrukcij `elektromehanicheskikh preobrazovatelej i vybor shemy `elektroamortizatora nepodressorennih mass transportnogo sredstva / A.N. Sergienko, B.G. Lyubarskij, N.E. Sergienko i dr. // Avtomobil'nyj transport. - Har'kov: Izd-vo HNADU / Sb. nauch. tr. - 2012. - Vyp. 31. 2. Sergienko A.N. Matematicheskaya model' `elektromehanicheskogo preobrazovatelya dlya `elektroamortizatora transportnogo sredstva / A.N. Sergienko, B.G. Lyubarskij, N.E. Sergienko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2012. - № 6. - S. 61-65. 3. Rezhim dostupa: <http://femm.berlios.de>. 4. De Bor K. Prakticheskoe rukovodstvo po splajnam: Per. s angl. - M.: Radio i svyaz', 1985. - 304 s. 5. Sergienko A. N. Ocena pokazatelej `elektro-amortizatora nepodressorennih mass transportnogo sredstva / Visnik NTU "HPI". Zb. nauk. prac'. Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannya. - №60 (966). - 2012. - S. 120-126. 6. Danilov Yu.A. Mnogochleny Chebysheva. - Mn.: Vysh. shk., 1984. - 157 s.

Поступила 09.02.2013

**Сергиенко Антон Николаевич**  
кафедра "Теория и системы автоматизированного  
проектирования механизмов и машин"  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076901, e-mail: antonsergienkomax@rambler.ru

**Любарский Борис Григорьевич, к.т.н., доц.**  
кафедра "Электрического транспорта и тепловозостроения"  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076367, e-mail: lboris19111972@mail.ru

**Сергиенко Николай Егорович, к.т.н., доц.**  
кафедра "Автомобиле- и тракторостроения"  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
тел. (057) 7076066, e-mail: ne\_sergienko@rambler.ru

**Sergienko A.N., Ljubarskiyi B.G., Sergienko N.E.**  
**Approximation of an electric shock absorber mathematical model parameters.**  
The paper introduces a procedure of approximating polynomial calculation to allow identifying magnetic linkage and electromagnetic force of an electric shock absorber mathematical model.  
**Key words – electric shock absorber, mathematical model, approximation, Chebyshev polynomials, power, magnetic linkage.**

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

*Побудовано математичну модель відхилення напруги в залежності від параметрів якості електроенергії та електропотреблення, що дозволяє прогнозувати параметри якості електроенергії в електрических мережах. Застосування отриманої моделі дозволить оптимізувати роботу електротехнічного комплексу.*

*Построена математическая модель отклонения напряжения в зависимости от параметров качества электроэнергии и электропотребления, позволяющая прогнозировать параметры качества электроэнергии в электрических сетях. Применение полученной модели позволит оптимизировать работу электротехнического комплекса.*

**Введение.** Исследования последних лет показали, что сниженное качество электроэнергии негативно влияет на работу электротехнического оборудования, приводит к нарушению технологического процесса, является причиной дополнительных капиталовложений, сказывается на работе устройств учета электроэнергии и др. [1-4]. Поэтому исследование режимов напряжения и их оптимизации в электрических сетях приобрели на сегодняшний день особую актуальность. На основании вышеизложенного нами проведены исследования по прогнозированию отклонения напряжения от параметров качества электроэнергии и электропотребления в электрических сетях 0,4 кВ коммунальных предприятий.

**Целью** настоящей работы является построение математической модели отклонения напряжения в зависимости от параметров качества электроэнергии и электропотребления, позволяющей прогнозировать отклонение напряжения в электрических сетях.

**Основная часть.** Для проведения прогнозирования поведения отклонений напряжения в электрических сетях коммунальных предприятий целесообразно применение методов регрессионного и дисперсионного анализа [5-7].

Для оценки закона распределения отклонения напряжения в сетях освещения необходимо построить регрессионную зависимость между флюктуациями напряжения  $\delta U$  (результатирующий фактор) и факторами  $P$  (кВт),  $I$ (А),  $P_t$  (доза фликера). Для каждого фактора имеется  $n = 24$  наблюдений, которым ставятся в соответствие  $n$  значений результатирующего фактора.

Гипотеза состоит в том, что  $\delta U$  связано с остальными факторами линейно, т.е.

$$\delta U = a_0 + a_1 I + a_2 P + a_3 P_t. \quad (1)$$

где величины  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – неизвестны и должны быть определены в дальнейшем.

Тогда для временных отсчетов  $t_j$  ( $j = 1 \dots 24$ )

$$\delta U_j = a_0 + a_1 I_j + a_2 P_j + a_3 P_{tj}, \quad (j = 1 \dots 24). \quad (2)$$

Таким образом, для вектора  $\vec{a} = (a_0, a_1, a_2, a_3)^T$  неизвестных коэффициентов имеем переопределенную систему уравнений, т.е. систему линейных уравнений, в которой количество уравнений больше числа неизвестных:

$$X\vec{a} = \vec{V}, \quad (3)$$

где  $\vec{V} = (\delta U_1, \delta U_2, \dots, \delta U_{24})^T$ .

$$X = \begin{pmatrix} 1 & I_1 & P_1 & P_{t1} \\ 1 & I_2 & P_2 & P_{t2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & I_{24} & P_{24} & P_{t24} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Полученную систему решаем методом наименьших квадратов (МНК). Составляем нормальную систему уравнений, домножая слева матрично-векторное уравнение на  $X^T$ , символом  $T$  обозначено трансионирование матрицы

$$X^T X \vec{a} = X^T \vec{V}, \quad (5)$$

решая которое с помощью оператора МНК, находим

$$\vec{a} = (X^T X)^{-1} X^T \vec{V}. \quad (6)$$

В нашем случае с помощью (6) было получено:

$$a_0 = 32,664; a_1 = 5,465; a_2 = 0,124; a_3 = -1,415.$$

Таким образом, получено, что наиболее сильная корреляция существует между  $\delta U$  и  $I$  (наибольший из коэффициентов при факторах  $a_1$ ).

Для оценки степени адекватности построенной регрессии реальному процессу, необходимо вычислить коэффициент множественной корреляции

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{j=1}^{24} e_j^2}{\sum_{j=1}^{24} (\delta U_j - \bar{\delta U})^2}}, \quad (7)$$

где  $e_j = \delta U_j - \hat{\delta U}_j$ ,  $\hat{\delta U}_j = a_0 + a_1 I_j + a_2 P_j + a_3 P_{tj}$ , ( $j = 1 \dots 24$ ) – значения флюктуаций напряжения, полученные с помощью регрессии, а

$$\bar{\delta U} = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \delta U_j. \quad (8)$$

На основании проведенных расчетов, было получено значение  $R = 0,789$ , которое говорит о вполне удовлетворительном согласии исходных данных с построенной моделью.

На рис. 1 показаны графики  $\bar{\delta U}_{j=1}^{24}$  и  $\delta U_{j=1}^{24}$ .

Полученная модель может быть использована для прогноза отклонения напряжения в электрических сетях.

Зададим вектор прогнозных значений

$$X_0 = (1, I_{np}, P_{np}, P_{tnn}) = (1; 33; 6; 1,1). \quad (9)$$

Тогда точечный прогноз

$$\delta U_{np} = X_0 \vec{a} = 2,652. \quad (10)$$

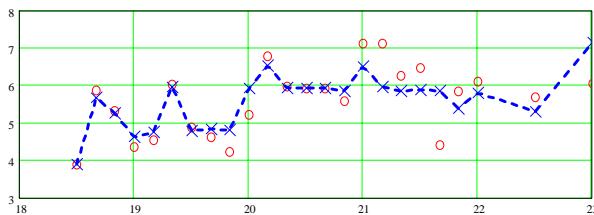


Рис. 1. Результаты аппроксимации и их сравнение с исходными данными

Оценим среднеквадратичное отклонение (СКО) прогноза

$$\delta U_{np} = t_{\varepsilon/2} \cdot S \left[ X_0^T (X^T X)^{-1} X_0 \right]^{1/2}. \quad (11)$$

В данном выражении

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{24} e_j^2}{n-m}}, \quad n = 24, \quad m = 24, \quad (12)$$

где  $t_{\varepsilon/2}$  – значение критерия Стьюдента для  $1-\varepsilon/2$  доверительной вероятности (берется значение  $\varepsilon/2$ , т.к. критерий двусторонний).

Получены доверительные интервалы для математического ожидания прогноза  $M(\delta U_{np})$  при различных значениях доверительной вероятности (для различных значений  $t_{\varepsilon/2}$ )

$$2,652 - \delta U_{np} < M(\delta U_{np}) < 2,652 + \delta U_{np}.$$

Так как  $P = 1-\varepsilon$ , то отсюда получим для  $P = 0,95$   
 $0.979 < M(\delta U_{np}) < 4.325$ .

В результате получены доверительные интервалы для математического ожидания прогноза отклонения напряжения в зависимости от качества электрической энергии с помощью математической модели.

Наличие высших гармоник напряжения и тока неблагоприятно сказывается на работе электротехнического оборудования, так как они вызывают дополнительные потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения. На основании вышеизложенного для выявления влияния на отклонение напряжения в зависимости от флюктуаций амплитуд гармоник нами была построена регрессионная зависимость между флюктуациями напряжения  $\delta U$  и флюктуациями отдельных гармоник  $A_3, A_5, A_7, A_9$ .

Для определения зависимости воспользуемся методикой предыдущего раздела, для каждого фактора имеется  $n = 24$  наблюдений,  $m = 5$ , которым ставятся в соответствие  $n$  значений результирующего фактора.

В результате проведенных расчетов получено, что наиболее сильная корреляция имеет место между отклонением напряжения ( $\delta U$ ) и флюктуациями 7-й и 9-й гармоник, а корреляция между флюктуациями напряжения 3-й и 5-й существенно слабее. Получены доверительные интервалы для математического ожидания прогноза с помощью математической модели.

**Выводы.** Таким образом, корреляция между флюктуациями напряжения и мощностью существенно слабее, чем корреляция с током или дозой фликера. Наиболее сильная корреляция имеет место между отклонением напряжения ( $\delta U$ ) и флюктуациями 7-й и 9-й гармоник, а корреляция между флюктуациями напряжения 3-й и 5-й существенно слабее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы её обеспечения в технике. / Э. Хабигер. - М.: Энергоатомиздат, 1995. – 231с.
- Гриб О. Г. Качество электрической энергии в системах электроснабжения / О. Г. Гриб [и др.]. – Харьков, ХНАГХ, 2006. – 272с.
- Шаров Ю. В. Управление качеством электроэнергии / Ю. В. Шаров [и др.]. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320с.
- Гриб О. Г. Контроль потребления электроэнергии с учетом её качества / О. Г. Гриб [и др.]. - Харків, ХНУРЕ, 2010. – 443 с.
- Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.
- Вентцель Е.С. Теория вероятностей. / Е. С. Вентцель. - М.: Наука, 1984. – 386 с.
- Моисеев Н.Н. Математические задачи системного характера. / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 488 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Habiger `E. `Elektromagnitnaya sovmestimost'. Osnovy ee obespecheniya v tehnike. / `E. Habiger. - M.: `Energoatomizdat, 1995. - 231s. 2. Grib O. G. Kachestvo `elektricheskoy `energii v sistemah `elektrosnabzheniya / O. G. Grib [i dr.]. - Har'kov, HNAGH, 2006. - 272s. 3. Sharov Yu. V. Upravlenie kachestvom `elektro`energii / Yu. V. Sharov [i dr.]. - M.: Izd. dom M`EI, 2006. - 320s. 4. Grib O. G. Kontrol` potrebleniya `elektro`energii s uchetom ee kachestva / O. G. Grib [i dr.]. - Harkiv, HNURE, 2010. - 443 s. 5. Gmurmam V. E. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika / V. E. Gmurmam: Ucheb. posobie. - M.: Vysshaya shkola, 2000. - 479 s. 6. Ventcel' E.S. Teoriya veroyatnostej. / E. S. Ventcel'. - M.: Nauka, 1984. - 386 s. 7. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo haraktera. / N. N. Moiseev. - M.: Nauka, 1981. - 488 s.

Поступила 25.01.2013

Сапрыка Василий Александрович

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

кафедра автоматизации энергосистем

61002, Харьков, Фрунзе, 21

тел. (068) 6166285, e-mail: vaska\_sapryka@yandex.ru

Sapryka V.A.

**Prediction of voltage fluctuation in electric grids.**

A mathematical model of voltage fluctuation versus parameters of power quality and power consumption is developed to allow predicting parameters of the power quality in electric grids. Application of the model will result in an electrical complex functioning optimization.

**Key words – voltage fluctuation, mathematical model, electrical grids.**

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

*У даній статті розглядаються основні питання про штучний інтелект і його впровадження у повсякденне життя людини у вигляді систем управління мехатронних систем. З-за інтенсивного введення останніх досягнень науково-технічного прогресу, нової елементної бази виникають нові технології реалізації принципів і законів створення штучного інтелекту, приклади використання яких приводяться у статті.*

*В данной статье рассматриваются основные вопросы об искусственном интеллекте и его внедрении в повседневную жизнь человека в виде систем управления мехатронных систем. Из-за интенсивного введения последних достижений научно-технического прогресса, новой элементной базы возникают новые технологии реализации принципов и законов создания искусственного интеллекта, примеры использования которых приводятся в статье.*

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальной темой на сегодняшний день является рациональное использование последних достижений научно-технического прогресса, в частности мехатронных систем и систем на базе искусственного интеллекта.

Мехатроника является научно-технической дисциплиной, которая изучает построение электромеханических систем нового поколения, обладающих принципиально новыми качествами и, часто, рекордными параметрами.

Некоторые исследователи видят главную суть мехатроники в объединении, прежде всего, механики и электроники, в отличие от электромеханики, появившейся в свое время на стыке механики и электротехники.

В современном мире в период бурного развития науки и технологий, остро встает вопрос, связанный с разработкой, созданием и внедрением мехатронных систем (МС) нового поколения систем автоматического и автоматизированного управления на базе достижений в области механики, автоматики, электроники и информатики [1]. Управление ими без непосредственного контроля человека, является определяющим в формировании нового технологического базиса – основы экономики высокоразвитых стран начала XXI века. Потому как они во многом обуславливают состояние и уровень развития оборонных отраслей промышленности, имеют первостепенное значение для обеспечения национальной безопасности, определяют новый технический уровень и технологический прогресс в важнейших сферах экономики.

Обычно мехатронная система является объединением собственно электромеханических компонентов с новейшей силовой электроникой, которые управляются с помощью различных микроконтроллеров, ПК (персональный компьютер) или других вычислительных устройств.

При этом система в истинно мехатронном подходе, несмотря на использование стандартных компонентов, строится как можно более монолитно, конструкторы стараются объединить все части системы воедино без использования лишних интерфейсов между модулями. В частности, применяя встроенные непосредственно в микроконтроллеры АЦП (аналого-цифровые преобразователи), интеллектуальные силовые преобразователи и т.п. Это уменьшает массу и размеры системы, повышает ее надежность и дает некоторые другие преимущества. Любая система, управляющая группой приводов, может считаться мехатронной. В частности, если она управляет группой реактивных двигателей космического аппарата [2].

Для улучшения быстродействия, надежности, потребляемой мощности, габаритов, стоимости и других качественных характеристик МС широко внедряется использование новой элементной базы – программируемых логических интегральных схем (ПЛИС – Programmable Logic Device – PLD). ПЛИС представляют собой интегральные схемы, обладающие гибкостью заказных больших интегральных схем и доступностью традиционной "жесткой" логики. Современные ПЛИС дают возможность настройки на выполнение заданных функций самим пользователем, таким образом реализовывать даже достаточно сложные проекты в сжатые сроки в виде конкурентоспособных устройств и систем. По существу, разработка устройств на основе ПЛИС представляет собой новую технологию проектирования МС, включая их изготовление и сопровождение [3]. В связи с техническим прорывом в области создания МС возникает вопрос о широком внедрении во все сферы человеческой деятельности "думающих" МС, т.е. вопрос об искусственном интеллекте (ИИ).

Объемы мирового производства мехатронных устройств ежегодно увеличиваются, охватывая все новые сферы. Сегодня мехатронные модули и системы находят широкое применение в следующих областях:

- станкостроение и оборудование для автоматизации технологических процессов;
- робототехника (промышленная и специальная);
- авиационная, космическая и военная техника;
- автомобилестроение (например, антиблокировочные системы тормозов, системы стабилизации движения автомобиля и автоматической парковки);
- нетрадиционные транспортные средства (электровелосипеды, грузовые тележки, электророллеры, инвалидные коляски);
- офисная техника (например, копировальные и факсимильные аппараты);
- элементы вычислительной техники (например, принтеры, плоттеры, дисководы);
- медицинское оборудование (реабилитационное, клиническое, сервисное);
- бытовая техника (стиральные, швейные, посудомоечные и другие машины);
- микромашины (для медицины, биотехнологии, средств телекоммуникации);
- контрольно-измерительные устройства и машины;
- фото- и видеотехника;
- тренажеры для подготовки пилотов и операторов;

- шоу-индустрия (системы звукового и светового оформления).

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Рассмотрим непосредственно вопросы о переходе от ручного управления мехатронными системами к управлению с помощью искусственного интеллекта.

Всё чаще термин ИИ используется в науке, а не писателями- фантастами в литературе. То, что раньше казалось невозможным и нереальным уже рядом с нами. Существует огромное количество определений термина ИИ, наиболее четко отражающее суть это то, что ИИ – это область компьютерной науки, занимающуюся автоматизацией разумного поведения МС.

Другими словами – это искусственные программные системы, созданные человеком на базе ЭВМ и имитирующие решение человеком сложных творческих задач в процессе его жизнедеятельности.

Понятие искусственный интеллект, как, впрочем, и просто интеллект, весьма расплывчаты. Если обобщить все сказанное за последние тридцать лет, то оказывается, что человек просто хочет создать себе подобного в той или иной форме, хочет, чтобы какие-то действия выполнялись более рационально, с меньшими затратами времени и энергии. С конца 40-х годов ученые все большего числа университетских и промышленных исследовательских лабораторий устроились к дерзкой цели: построение компьютеров, действующих таким образом, что по результатам работы их невозможно было бы отличить от человеческого разума. В последнее время наблюдается возрастание интереса к искусственному интеллекту, вызванное повышением требований к информационным системам. Умнеет программное обеспечение, умнеет бытовая техника. Мы неуклонно движемся к новой информационной революции, сравнимой по масштабам с развитием Интернета, имя которой – искусственный интеллект.

В последнее время можно проследить постепенное превращение программной инженерии в интеллектуальную инженерию, рассматривающую более общие проблемы обработки информации и представления знаний.

Можно выделить две составляющих ИИ: первая – это работы, повсещенные моделированию деятельности человеческого мозга, а вторая – создание систем автоматического решения творческих задач на ЭВМ (электронная вычислительная машина), без учета процессов в человеческом сознании.

#### **ВНЕДРЕНИЕ ИИ В УПРАВЛЕНИИ МС**

Программные средства, базирующиеся на технологии и методах искусственного интеллекта, получили значительное распространение в мире. Их важность, и, в первую очередь, экспертных систем и нейронных сетей, состоит в том, что данные технологии существенно расширяют круг практически значимых задач, которые можно решать на компьютерах, и их решение приносит значительный экономический эффект.

Основные области, требующие внедрения ИИ:

- виртуальная реальность;
- роботы;
- интеллектуальная технология поиска, анализа и синтеза всех видов информации
- экспертные системы и нейронные сети

Во всех перечисленных областях, а также во многих других приложениях ИИ ключевыми остаются две доминанты:

1. Интеллектуализация пользовательского интерфейса, поскольку "взаимопонимание" пользователя и компьютера является необходимым условием эффективности любой человеко-машинной системы.

2. Повышение качества работы самого компьютера, которая сводится, в конце концов, к все более результивному решению все более сложных задач, как хорошо, так и все более плохо формализуемых.

Сначала вкратце рассмотрим наиболее активно развиваемые подходы ИИ – в порядке убывания их популярности у специалистов. Надо отметить, что меньшая популярность нередко связана не столько с потенциалом технологии, сколько с удаленностью перспектив ее прикладной реализации (например, крайне высокий потенциал кибер заводов пока не вызывает серьезного интереса из-за наличия множества нерешенных задач по их управлению).

1. Нейронные сети. Это направление стабильно держится на первом месте. Продолжается совершенствование алгоритмов обучения и классификации в масштабе реального времени, обработки естественных языков, распознавания изображений, речи, сигналов, а также создание моделей интеллектуального интерфейса, подстраивающегося под пользователя. Среди основных прикладных задач, решаемых с помощью нейронных сетей: финансовое прогнозирование, раскопка данных, диагностика систем, контроль за деятельностью сетей, шифрование данных. В последние годы идет усиленный поиск эффективных методов синхронизации работы нейронных сетей на параллельных устройствах.

2. Эволюционные вычисления. На развитие сферы эволюционных вычислений (ЭВ; автономное и адаптивное поведение компьютерных приложений и робототехнических устройств) значительное влияние оказали, прежде всего, инвестиции в нанотехнологии. ЭВ затрагивают практические проблемы самосборки, самоконфигурирования и самовосстановления систем, состоящих из множества одновременно функционирующих узлов. При этом удается применять научные достижения из области цифровых автоматов [4].

Другой аспект ЭВ – использование для решения повседневных задач автономных агентов в качестве персональных секретарей, управляющих личными счетами, ассистентов, отирающих нужные сведения в сетях с помощью поисковых алгоритмов третьего поколения, планировщиков работ, личных учителей, виртуальных продавцов и т.д. Сюда же относится робототехника и все связанные с ней области. Основные направления развития: выработка стандартов, открытых архитектур, интеллектуальных оболочек, языков сценариев/запросов, методологий эффективного взаимодействия программ и людей. Модели автономного поведения предполагается активно внедрять во все возможные бытовые устройства, способные убирать помещения, заказывать и готовить пищу, водить автомобили и т.п.

В дальнейшем для решения сложных задач (быстрого исследования содержимого Сети, больших массивов данных наподобие геномных) будут использоваться коллективы автономных агентов. Для этого придется заняться изучением возможных направлений эволю-

ции подобных коллективов, планирования совместной работы, способов связи, группового самообучения, кооперативного поведения в нечетких средах с неполной информацией, коалиционного поведения агентов, объединяющихся "по интересам", научиться разрешать конфликты взаимодействия и т. п.

Особняком стоят социальные аспекты – как общество будет на практике относиться к таким сообществам интеллектуальных программ.

3. На третьем – пятом местах (по популярности) располагаются большие группы различных технологий.

3.1 Нечеткая логика. Системы нечеткой логики активнее всего будут применяться преимущественно в гибридных управляющих системах.

3.2 Обработка изображений. Продолжится разработка способов представления и анализа изображений (сжатие, кодирование при передаче с использованием различных протоколов, обработка биометрических образов, снимков со спутников), независимых от устройств воспроизведения, оптимизации цветового представления на экране и при выводе на печать, распределенных методов получения изображений. Дальнейшее развитие получат средства поиска, индексирования и анализа смысла изображений, согласования содержимого справочных каталогов при автоматической каталогизации, организации защиты от копирования, а также машинное зрение, алгоритмы распознавания и классификации образов.

3.3. Экспертные системы. Спрос на экспертные системы остается на достаточно высоком уровне. Наибольшее внимание сегодня привлечено к системам принятия решений в масштабе времени, близком к реальному, средствам хранения, извлечения, анализа и моделирования знаний, системам динамического планирования.

3.4. Интеллектуальные приложения. Рост числа интеллектуальных приложений, способных быстро находить оптимальные решения комбинаторных проблем (возникающих, например, в транспортных задачах), связан с производственным и промышленным ростом в развитых странах.

3.5. Распределенные вычисления. Распространение компьютерных сетей и создание высокопроизводительных кластеров вызвали интерес к вопросам распределенных вычислений - балансировке ресурсов, оптимальной загрузке процессоров, самоконфигурированию устройств на максимальную эффективность, отслеживанию элементов, требующих обновления, выявлению несоответствий между объектами сети, диагностированию корректной работы программ, моделированию подобных систем.

3.6. ОС РВ. Появление автономных робототехнических устройств повышает требования к ОС реального времени – организации процессов самонастройки, планирования обслуживающих операций, использования средств ИИ для принятия решений в условиях дефицита времени.

3.7. Интеллектуальная инженерия. Особую заинтересованность в ИИ проявляют в последние годы компании, занимающиеся организацией процессов разработки крупных программных систем (программной инженерии). Методы ИИ все чаще используются для анализа исходных текстов и понимания их смысла, управления требованиями, выработкой спецификаций, проектирования, кодогенерации, верификации, тестирования, оценки качества, выявления возможности повторного

использования, решения задач на параллельных системах. Программная инженерия постепенно превращается в так называемую интеллектуальную инженерию, рассматривающую более общие проблемы представления и обработки знаний (пока основные усилия в интеллектуальной инженерии сосредоточены на способах превращения информации в знания).

3.8. Самоорганизующиеся СУБД. Самоорганизующиеся СУБД будут способны гибко подстраиваться под профиль конкретной задачи и не потребуют администрирования.

4. Следующая по популярности группа технологий ИИ.

4.1. Автоматический анализ естественных языков (лексический, морфологический, терминологический, выявление незнакомых слов, распознавание национальных языков, перевод, коррекция ошибок, эффективное использование словарей).

4.2. Высокопроизводительный OLAP-анализ и раскопка данных, способы визуального задания запросов.

4.3. Медицинские системы, консультирующие врачей в экстренных ситуациях, роботы-манипуляторы для выполнения точных действий в ходе хирургических операций.

4.4. Создание полностью автоматизированных кибер заводов, гибкие экономные производства, быстрое прототипирование, планирование работ, синхронизация цепочек снабжения, авторизация финансовых транзакций путем анализа профилей пользователей.

5. Небольшое число конференций посвящено выработке прикладных методов, направленных на решение конкретных задач промышленности в области финансов, медицины и математики.

Традиционно высок интерес к ИИ в среде разработчиков игр и развлекательных программ (это отдельная тема). Среди новых направлений их исследований – моделирование социального поведения, общения, человеческих эмоций, творчества.

#### ПЕРЕХОД ОТ РУЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ К ИИ

Существует множество предпосылок для перехода от ручного управления к ИИ, потому как очень многое зависит от человеческого фактора: люди устают, внимание рассеивается, бдительность ослабевает, а это может привести к катастрофическим последствиям.

Приведем несколько наиболее интересных примеров перехода к управлению с помощью ИИ.

В настоящее время более эффективное внедрение и использование новых типов систем автоматизированного управления (САУ) для объектов газотранспортного комплекса является одним из наиболее перспективных направлений исследований в данной отрасли, поскольку повышение эффективности внедрения и использования объектов данного типа является одной из важнейших задач при развитии энергетической инфраструктуры государства [5]. ГРС выполняет функции обеспечения поставок природного газа из центральных газотранспортных магистралей, а также последующего его распределения между населенными пунктами (использование газа в бытовых целях) и различными промышленными предприятиями (использование газа в качестве сырья, либо источника полезной энергии для различных видов работ). Данный тип объектов является одним из наиболее важных во всей энергетической инфраструктуре государства и поэтому для обеспечения стабильного и безопасного функ-

ционирования ГРС в настоящее время интенсивно разрабатываются и внедряются новые виды САУ. Этот факт и определяет необходимость разработки электронных контрольно-проверочных комплексов, отвечающих всем современным требованиям. Наиболее оптимальным и удобным методом решения поставленных задач является синтез универсальной и гибкой модели контроля для построения на ее основе универсальных контрольно-проверочных комплексов [6].

Использование медицинских роботов, в частности робота "Да Винчи", вместе с бригадой проведен первый в мире полностью эндоскопический бypass, выполненный совсем недавно в Колумбийском Пресвитерианском медицинском центре в Нью-Йорке.

Применяется ИИ, как уже говорилось, в современном мире, практически в любой отрасли деятельности человека. На данный момент существуют роботы-помощники, военные разработки роботов, космические, бытовые и даже медицинские.

Очень интересным аспектом является то, что стало возможным применять разработки ИИ именно в медицине. Её развитие не стоит на месте, появляются новее сложнейшие аппараты, для жизнеобеспечения человека, примером тому могут стать множество аппаратов, например аппарат для искусственной вентиляции легких, либо аппарат искусственной почки и т.п. Появились миниатюрные измерители сахара в крови, электронные измерители пульса и давления, роботы, выполняющие сложнейшие операции практически без контроля человека-оператора.

В конце данного очень краткого обзора рассмотрим примеры крупномасштабных экспертных систем.

MICIN – экспертная система для медицинской диагностики. Разработана группой по инфекционным заболеваниям Стенфордского университета. Ставит соответствующий диагноз, исходя из представленных ей симптомов, и рекомендует курс медикаментозного лечения любой из диагностированных инфекций. База данных состоит из 450 правил.

PUFF – анализ нарушения дыхания. Данная система представляет собой MICIN, из которой удалили данные по инфекциям и вставили данные о легочных заболеваниях.

DENDRAL – распознавание химических структур. Данная система старейшая, из имеющих звание экспертных. Первые версии данной системы появились еще в 1965 г. во все том же Стенфордском университете. Пользователь дает системе DENDRAL некоторую информацию о веществе, а также данные спектрометрии (инфракрасной, ядерного магнитного резонанса и масс-спектрометрии), и та в свою очередь выдает диагноз в виде соответствующей химической структуры.

PROSPECTOR – экспертная система, созданная для содействия поиску коммерчески оправданных месторождений полезных ископаемых.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная тема является очень актуальной, так как внедрение ИИ значительно облегчает жизнь человека, естественно, что МС также может дать сбой, могут возникать ошибки, необходимо учитывать и эти факторы. С каждым днем научно-технический прогресс не стоит на месте, а идет вперед, а с ним и развитие ИИ, который всё прочнее внедряется в нашу жизнь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование динамики мехатронных систем. Уравнения и алгоритмы: монография / Д.В. Кузьмин. – Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. – 120 с.
2. Соловьев В.В. Проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001. – 636 с. ил.
3. Собчак А.П., Марченко А.М. Разработка цифровых устройств на базе программируемых логических интегральных схем / Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. – № 6.
4. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. Пер. с англ. – 118 с.
5. Собчак А.П., Ефременко П.Е. Использование программно-аппаратной модели контроля САУ ГРС как один из вариантов динамического метода отладки АСУ ТП / Міжнародна науково-практична конференція "Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007": Тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет "ХАІ", 2007. – С. 338-339.
6. Собчак А.П., Ефременко П.Е. Синтез структуры программно-аппаратной модели контроля системы автоматизированного управления газораспределительной станцией / Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. Радиоэлектроника и информатика. – Харьков. – 2007. – № 22. – С. 40-46

**Bibliography (transliterated):** 1. Modelirovanie dinamiki mehatronnyh sistem. Uravneniya i algoritmy: monografiya / D.V. Kuz'min. - Arhangelsk: Arhang. gos. tehn. un-t, 2008. - 120 s. 2. Solov'ev V.V. Proektirovaniye cifrovych sistem na osnove programmireemyh logicheskikh integral'nyh shem. - M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2001. - 636 s. il. 3. Sobchak A.P., Marchenko A.M. Razrabotka cifrovych ustroystv na baze programmireemyh logicheskikh integral'nyh shem / Informacijno-keruyuchi sistemi na zaliznicznomu transporti. - 2002. - № 6. 4. Uossermen F. Nejrokomp'yuternaya tekhnika: Teoriya i praktika. Per. s angl. - 118 s. 5. Sobchak A.P., Efremenko P.E. Ispol'zovanie programmo-apparatnoj modeli kontrolya SAU GRS kak odin iz variantov dinamicheskogo metoda otladki ASU TP / Mizhnarodna naukovo-praktichna konferenciya "Integrovani komp'yuterni tehnologii v mashinobuduvanni IKTM-2007": Tezi dopovidej. - Harkiv: Nacional'nij aerokosmichnj universitet "HAI", 2007. - S. 338-339. 6. Sobchak A.P., Efremenko P.E. Sintez struktury programmo-apparatnoj modeli kontrolya sistemy avtomatizirovannogo upravleniya gazoraspredelitel'noj stanciej / Avtomatizirovannye sistemy upravleniya i pribory avtomatiki. Radio`elektronika i informatika. - Har'kov.- 2007. - № 22. - S. 40-46

Поступила 07.05.2013

Собчак Андрей Павлович, к.т.н., доц.

Кот Мария Геннадьевна

факультет радиотехнических систем летательных аппаратов кафедра производства радиоэлектронных систем

летательных аппаратов

Национальный аэрокосмический университет

им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"

61070, Украина, Харьков, ул. Чкалова 17

тел. (057) 7884353

Sobchak A.P., Kot M.G.

**Application of artificial intelligence in mechatronic systems.**

This article discusses the main issues of artificial intelligence and its implementation in daily life in the form of control systems for mechatronic systems. Due to intensive application of the latest scientific and technological achievements and a new element base, there spring up new technologies of artificial intelligence creation principles and laws realization, examples of which given in the article.

**Key words – artificial intelligence, mechatronic systems, FPGAs, mechatronic system control.**

## ЗЕКЦЕР ДАВЫД МАРКОВИЧ

(к 90-летию со дня рождения)

Исполнилось 90 лет действительному члену Инженерной Академии Украины, кандидату технических наук, известному высококвалифицированному специалисту в области релестроения, Почетному железнодорожнику СССР Давыду Марковичу Зекцеру.

Давыд Маркович родился 5 мая 1923 г. в г. Белгород-Днестровский Одесской обл. Среднюю школу окончил с отличием в июне 1941 г. и в декабре 1942 г. был призван в армию. С февраля 1943 г. в составе пехоты, участвовал в боевых действиях, командир отделения ПТР. За бои на плацдарме Северского Донца в районе г. Лисичанска был награжден медалью "За отвагу". В конце мая 1943 г. был тяжело ранен и в октябре 1943 г. после длительного лечения в госпиталях был демобилизован как инвалид войны 2 группы. Как участник боевых действий награжден 22 орденами и медалями.

Сразу после демобилизации поступил в Ленинградский электротехнический институт на факультет автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. В институте учился только на "отлично" и закончил его с красным дипломом. Его дипломный проект, посвященный сложным двухэлементным секторным реле переменного тока, по решению Государственной Экзаменационной Комиссии был рекомендован к изданию в виде монографии.

После окончания института был распределен в Харьков на электротехнический завод "Трансвязь", где проработал в течение 28 лет, пройдя путь от инженера в лаборатории новых разработок до начальника производства и заместителя главного инженера по новой технике.

Работая на заводе, защитил кандидатскую диссертацию в Москве в Центральном научно-исследовательском институте МПС, где ему была присуждена ученая степень кандидата технических наук. Одновременно закончил Ленинградский университет Марксизма-Ленинизма, Высшие экономические курсы при Харьковском институте радиоэлектроники и курсы руководящих работников в Москве при Инженерно-экономическом институте им. С. Орджоникидзе.

Давыд Маркович разработал и внедрил в серийное производство несколько серий новых реле с магнитной памятью без постоянных магнитов, реле с большим замедлением, работающее в повторнократковременном режиме, кодовые многоконтактные реле. Широкий кругозор и разносторонние знания позволили Давыду Марковичу разработать и освоить в серийном производстве индукционные датчики больших перемещений без источника питания для работы в наружных условиях, магнитные усилители и релейно-реверсивном режиме для переездной сигнализации, комплексные электропитающие установки со стабилизацией на стороне переменного и постоянного тока, аппараты селек-

торной диспетчерской связи, первые трансмиттерные полупроводниковые импульсные датчики и усилители, исследовать алюмомедные шины и провода, герконы, феррорезонансные стабилизаторы, контактоны на герконах и другие устройства.

С 1976 г. Давыд Маркович в течение 18 лет работал заведующим сектора прогнозирования и оценки технического уровня низковольтных аппаратов во Всесоюзном научно-исследовательском институте Электроаппаратостроения (ВНИИЭА). В 1992 г. перешел на работу в Комплексный инновационный центр (КИЦ) Института проблем машиностроения Национальной Академии наук Украины в качестве заведующего лабораторией проблем электроприводостроения.

Во время работы на заводе, в НИИ и КИЦ Давыд Маркович много внимания уделял разработке теории и методики расчета реле с магнитной памятью, плоских электромагнитных реле, оптимизации медных демпферов для импульсных замедленных реле, расчетам и проектированию ин-

дукционных и индуктивных датчиков больших перемещений, а также уточнению расчетов магнитных проводимостей методами численного интегрирования. Известны его публикации по оптимизации различных электромагнитных реле, защитных оболочек, шкафов и ящиков, а также по исследованию биметаллических электрических контактов, антиканцерогенных и антиокислических электрических контактов и т.д.

Им было опубликовано более 200 статей и монографий, в том числе около тридцати работ – в США и Англии. В них приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований в различных областях: релестроения, развития технического уровня отечественных и зарубежных низковольтных аппаратов, выявления действительных условий работы низковольтных аппаратов и комплектных устройств. Кроме того, Давыд Маркович участвовал в разработке ОСТов по оценке технического уровня и его прогнозированию.

Давыд Маркович получил свыше 30 авторских свидетельств на изобретения. За успешные разработки новой техники ему присвоено звание "Почетный железнодорожник", им получены знаки отличия за пуск первой очереди Киевского Метрополитена и за участие в электрификации магистрали Москва-Байкал. Кроме того, он награжден тремя медалями за экспонаты на ВДНХ и медалью "Изобретатель СССР". В 2000 г. Давыд Маркович был избран действительным членом Инженерной академии Украины. Участвовал в семинарах, всесоюзных конференциях и международных симпозиумах с докладами.

Плодотворная научно-производительная деятельность, целеустремленность и связь с практическими задачами, принесла юбиляру широкую известность в СНГ и за рубежом. Его труды цитируют ученые США, Англии, Болгарии, Румынии и других стран.

Друзья, товарищи и коллеги по работе желают Давыду Марковичу доброго здоровья, счастья и новых успехов в его плодотворной деятельности.

Редакционная коллегия журнала "Электротехника и электромеханика" присоединяется к этим пожеланиям.



## ЮХИМЧУК ВЛАДИМИР ДАНИЛОВИЧ

(к 75-летию со дня рождения)

30 мая свой 75-летний юбилей отмечает профессор кафедры электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Юхимчук Владимир Данилович.

В далеком мае 1960 года, после службы в рядах Советской Армии, Владимир Данилович поступил на работу старшим препаратором кафедры "Электрические машины". В прошлом тракторист и танкист, он приступил к практическому освоению электротехники в крупнейшей в СССР и Европе Копняевской лаборатории электрических машин.

С 1962 года Юхимчук В.Д. – студент-вечерник, а параллельно – лаборант, механик, учебный мастер, инженер и заведующий лабораторией кафедры электрических машин.

В 1971 году начинается его научно-педагогическая деятельность – он ассистент, старший научный сотрудник, а в 1980 году, после окончания заочной аспирантуры – успешная защита кандидатской диссертации на тему "Модернизация двигателей постоянного тока при питании от пульсирующего напряжения".

С 1982 года Владимир Данилович – доцент кафедры "Электрические машины". С этого времени начинает ярко проявляться его дар педагога, методиста, ученого-практика. Основные усилия Юхимчук В.Д. направляет на объединение теоретических знаний с практической подготовкой будущих специалистов на электромашиностроительных предприятиях Харькова и других городов.

За время работы на кафедре Владимир Данилович подготовил и преподавал курсы – «Эксплуатация, ремонт и диагностика электрических машин», «Технология обмоточно-изоляционного производства», «Технология производства электрических машин», «Технология производства электрических микромашин», «Технология производства электрических машин большой мощности».

В декабре 2007 года Ученый Совет НТУ "ХПИ" присваивает Юхимчуку В.Д. звание профессора нашего университета. Он является автором более ста научных работ, из них 24 авторских заявок и патентов, автор 30 учебно-методических пособий, трех учебных пособий с грифом Министерства образования Украины – "Технология ремонта машин постоянного тока" и "Технология производства электрических машин" в двух томах. Эти труды, без преувеличения, стали настольными книгами десятков специалистов-электромашиностроителей в нашей стране, а также в ближнем и дальнем зарубежье. Свой юбилей Владимир Данилович отметил выходом в свет учебника "Технологія виробництва електрических машин"

для студентов высших учебных заведений, а Академия технологических наук приняла его в свои ряды.

Владимир Данилович уделяет много внимания совершенствованию учебного процесса, подготовке

молодых преподавателей. Особенно следует отметить его работу по обновлению лабораторной базы и созданию учебно-методического обеспечения всех видов учебных занятий, созданию и приобретению плакатов, стендов, деталей, узлов и макетов электрических машин.

Юхимчук В.Д. имеет тесные связи практически со всеми электротехническими предприятиями Украины, на харьковских заводах его знают от рабочего, бригадира до генерального директора, он консультант и рецензент по многим новым технологическим процессам и конструктивным исполнениям электрических машин.

Бывшие студенты Владимира Даниловича стали директорами электромашиностроительных предприятий, главными инженерами, главными конструкторами, начальниками управлений, служб, отделов, ведущими специалистами. Для многих из них первое знакомство с предприятием началось на тех заводских экскурсиях, которые проводил по своим читаемым дисциплинам Владимир Данилович.

Основные направления его научной деятельности – расчет, конструирование и экспериментальные исследования электрических машин общепромышленного назначения и рудничных тяговых электродвигателей, а также конструктивная разработка и исследования высокомоментных низкооборотных электродвигателей с катящимся ротором.

Около 20 лет Владимир Данилович работает в совете библиотеки университета, проводит работу по сбережению и обновлению книжного фонда. Он также входит в совет музея университета, где проводит работу по обновлению и пополнению экспонатов музея. В начале 70-х он разработал логотип нашей институтской многотиражки, который просуществовал около 20 лет.

Человек высокой эрудиции, такта, доброжелательности и юмора – таким его любят и уважают студенты и сотрудники кафедры и университета.

Такие люди делают нашу историю.

Коллектив электромашиностроительного факультета и кафедры "Электрические машины" НТУ "ХПИ", многочисленные друзья и коллеги поздравляют Владимира Даниловича с юбилеем, желают ему и его близким крепкого здоровья, большого счастья и творческих успехов во всех сферах его многогранной деятельности.

Редакция журнала «Электротехника и электромеханика» присоединяется к этим пожеланиям.