



---

***Електротехніка і Електроомеханіка***

***Электротехника и Электромеханика***

***Electrical engineering & Electromechanics***

---

**2006'5**



**Електротехніка і Електромеханіка**  
**Электротехника и Электромеханика**  
**Electrical engineering & Electromechanics**

**EIE**

**Науково-практичний журнал**

**2006'5**

**Держвидання**

**Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України**  
**КВ № 6115 від 30.04.2002 р.**

*Видання засновано Національним технічним університетом "Харківський політехнічний інститут" у 2002 р.*

**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 кафедри вищої математики НТУ "ХПІ", Харків

**Босв 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

**Вороновський Г.К.** д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, завідувач кафедри електричних станцій НТУ "ХПІ", Харків

**Гончаров Ю.П.** д.т.н., професор кафедри промислової та біометричної 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)

**Загірняк М.В.** д.т.н., професор, ректор КДПУ, Кременчук

**Кириленко О.В.** д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, заступник директора ІЕД НАНУ, Київ

**Кравченко В.І.** д.т.н., професор, директор НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків

**Лупіков В.С.** д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних апаратів 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

**Мілих В.І.** д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин НТУ "ХПІ", Харків

**Набока Б.Г.** д.т.н., професор кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ "ХПІ", Харків

**Намітоков К.К.** д.т.н., професор кафедри світлотехніки і джерел світла ХНАМГ, Харків

**Омельяненко В.І.** д.т.н., професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ", Харків

**Панасенко М.В.** д.т.н., професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ", Харків

**Подольцев О.Д.** д.т.н., провідний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ

**Пуйло Г.В.** д.т.н., професор кафедри електричних машин ОНТУ, Одеса

**Резцов В.Ф.** д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, керівник відділення ІЕД НАНУ, Київ

**Рудаков В.В.** д.т.н., професор, завідувач кафедри інженерної електрофізики НТУ "ХПІ", Харків

**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 РЕДКОЛЕГІЇ**

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002.

Тел. (057) 707-62-81. E-mail: eie@kpi.kharkov.ua

# ЗМІСТ

## *Електротехніка: Визначні події. Славенні імена*

<b>Баранов М.И.</b>	Ретроспектива исследований в области искусственного и атмосферного электричества и молниезащиты технических объектов	<b>5</b>
---------------------	--	----------

### *Електричні машини та апарати*

<b>Болюх В.Ф.</b>	Пути совершенствования линейных электромеханических преобразователей импульсного действия	<b>14</b>
<b>Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер</b>	Исследование моделей электромашинно-вентильных преобразователей с ограниченным числом полностью управляемых вентилях	<b>22</b>
<b>Гречко М.В., Дяченко В.В.</b>	До питання оптимізації конструктивних параметрів автотранспортних індукторних генераторів	<b>30</b>
<b>Гуль В.И., Нижевский В.И., Нижевский И.В.</b>	Электрические характеристики двухуровневого эквипотенциального заземлителя из одиночных горизонтальных электродов	<b>33</b>
<b>Капинос В.М., Навроцкий В.В., Смородская И.В.</b>	Тепловой расчет ленточного электронагревателя воздуха	<b>36</b>
<b>Павленко Т.П.</b>	Механизм перемещения заряженных частиц в кристаллической решетке контактной композиции	<b>39</b>
<b>Себко В.В.</b>	О влиянии доминирующих примесей на электромагнитные параметры цилиндрического изделия	<b>42</b>
<b>Себко В.П., Филоненко Д.В., Ноздрачева Е.Л.</b>	Расчет ожидаемых значений компонентов сигналов трехпараметрового электромагнитного преобразователя	<b>44</b>
<b>Фомин В.И.</b>	Влияние числа последовательных перешейков на защитные характеристики быстродействующих плавких предохранителей	<b>46</b>

### *Техніка сильних електричних та магнітних полів*

<b>Баранов М.И.</b>	Электродинамическое развитие квантовой теории атома Бора	<b>48</b>
<b>Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А.</b>	Вихревые токи в плоских листовых металлических заготовках	<b>54</b>
<b>Кравченко В.И., Яковенко И.В., Глухов Е.В.</b>	Потери энергии потока заряженных частиц на возбуждение электромагнитных колебаний в полупроводниковых структурах	<b>60</b>
<b>Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В.</b>	Неустойчивость поверхностных волн при их взаимодействии с потоком заряженных частиц в полупроводниковых структурах	<b>64</b>

## **Електричні станції**

<b>Орловский И.В.</b>	Пути совершенствования управления расходом электрической энергии в цехе химводоподготовки харьковской ТЭЦ-5	<b>67</b>
-----------------------	---	-----------

## **Електричний транспорт**

<b>Хворост М.В.</b>	Тягова асинхронна електропередача метровагона підвищеної ефективності	<b>71</b>
---------------------	---	-----------

<b>Список авторів</b>		<b>77</b>
-----------------------	--	-----------

<b>Поправка</b> к статье "О математических некорректностях...", "Электротехника и Электромеханика" 2006, №3		<b>77</b>
---	--	-----------

<b>Abstracts</b>		<b>78</b>
------------------	--	-----------

<b>Вимоги</b> до оформлення статей і інформаційних матеріалів у науково-практичному журналі "Електротехніка і електромеханіка"		<b>80</b>
--	--	-----------

## **ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!**

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

## **ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!**

*Постановою Президії ВАК України від 15.01.03 № 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. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.*

*Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу "Електротехніка і Електромеханіка" та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВИНИТИ. Згідно з цим договором ВИНИТИ надає редакції журналу звіт про відображення статей з журналу у РЖ та БД ВИНИТИ. Звіт ВИНИТИ за 2005 рік буде опубліковано в одному з номерів журналу за 2006 рік.*

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

*Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів відповідно до Вимог, які публікуються у кожному номері журналу. Статті, оформлені згідно з Вимогами будуть публікуватися у першу чергу.*

## РЕТРОСПЕКТИВА ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИСКУССТВЕННОГО И АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МОЛНИЕЗАЩИТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

*Наведено короткий науково-історичний нарис про початковий етап вивчення людством магнітних та електричних явищ, засновниках захисту технічних об'єктів від дії електричних розрядів атмосферної електрики (блискавки) і корифейв всесвітньої фізичної науки – Франкліна, Ріхмана та Ломоносова, а також про проблемні питання блискавкозахисту цих об'єктів у сучасних умовах розвитку техносфери.*

*Приведен краткий научно-исторический очерк о начальном этапе изучения человечеством магнитных и электрических явлений, основоположниках защиты технических объектов от воздействия электрических разрядов атмосферного электричества (молнии) и корифеях мировой физической науки – Франклине, Рихмане и Ломоносове, а также о проблемных вопросах молниезащиты этих объектов в современных условиях развития техносферы.*

### 1. ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Пути развития познания человеком природы одновременно являются и путями развития нашей науки. Изучение этих путей и истории науки обогащает, на мой взгляд, нас теми знаниями, которые способствуют более быстрому, экономичному и эффективному развитию соответствующих научных отраслей и направлений. Как известно, слово "ретроспектива", имеющее латинское происхождение и вынесенное автором в название данной статьи, обозначает "обозрение того, что было в прошлом" [1]. Согласно мировой истории развития физики научное начало изучению электричества и магнетизма было положено вышедшей в 1600 году книгой английского врача Уильяма Гильберта "О магните, магнитных телах в большом магните, новая физиология" [2]. В этой книге он первым дал правильное объяснение поведению магнитной стрелки в компасе, указывая что: "...Ее конец не влечется к небесному полюсу, а притягивается полюсами земного магнита" [2]. С современных научных позиций магнитная стрелка компаса находится под воздействием земного магнетизма и ее положение определяется магнитным полем Земли. У. Гильберт также первым открыл усиление магнитного действия железным якорем и правильно объяснил это явление намагничиванием железа. Им было установлено, что намагничивание железа (стали) происходит и на расстоянии от магнита (явление магнитной индукции). Важный шаг сделал У. Гильберт и в изучении электрических явлений. Он экспериментально обнаружил, что, кроме янтаря, свойство притягивать легкие предметы после натирания имеют и ряд других тел (например, горный хрусталь, сера, смола и др.). Эти тела он назвал "электрическими", то есть подобными янтарю. Все другие тела и, в первую очередь, металлы, которые не обнаруживали, по его мнению, таких свойств, У. Гильберт назвал "неэлектрическими". Так в науку впервые вошел термин "электричество", имеющий греческие "корни", и так было положено начало систематическому изучению элек-

трических явлений. Заметим, что после исследования вопроса о сходстве магнитных и электрических явлений У. Гильберт пришел к выводу, что эти явления природы глубоко различны и не связаны между собой. Такой точке зрения придерживались в науке более двухсот лет, пока известный датский физик Ханс Эрстед в 1820 году не открыл магнитное поле, вызванное электрическим током. Свое знаменитое открытие он описал в брошюре "Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку". Великий итальянский физик и математик Галилео Галилей в своем "Диалоге" об указанной выше книге У. Гильберта написал следующее [2, 3]: "...Он заслуживает высочайшей похвалы и я не сомневаюсь, что со временем эта отрасль науки сделает успехи как вследствие новых наблюдений, так и в особенности вследствие строгого метода доказательства. Но это не умоляет славы первого изобретателя".

Электрическими опытами занимался и великий английский физик и математик Исаак Ньютон, который еще в 1675 году наблюдал "электрическую пляску" кусочков бумаги, помещенных под стеклом (изолятором), положенным на массивное металлическое кольцо [2]: при натирании стекла снаружи бумажки притягивались к нему (стеклу), затем отскакивали, вновь притягивались и т.д. В 1716 году И. Ньютон наблюдал искровой разряд между острием иголки и наэлектризованным телом. Об увиденном явлении он в свое время написал [2]: "...Искра напоминала мне о молнии в малых, очень малых размерах". Эксперименты по электричеству проводили и другие члены Лондонского Королевского общества (Английской Академии наук). Так, известный английский физик и химик Роберт Бойль в конце XVII столетия установил, что наэлектризованное тело не только притягивает ненаэлектризованное, но и, в свою очередь, притягивается последним. Он показал, что электрическое взаимодействие тел наблюдается и в вакууме [2]. В 1729 году Стефэн Грей, также член Лондонского Ко-

ролевского общества, открыл электропроводность тел и показал, что для сохранения электричества тело должно быть изолировано [2].

Опыты С. Грея продолжил французский естествоиспытатель Шарль Дюфэ, создавший первую описательную теорию электрических явлений. Им были установлены два рода электрических взаимодействий: притяжение и отталкивание. Об открытом им обобщенном принципе (законе) электрического взаимодействия он писал [2]: "...Этот принцип состоит в том, что существует электричество двух родов, в высокой степени отличных один от другого: один род я называю "стеклянным электричеством", а другой – "смоляным электричеством". Особенность этих двух родов электричества: отталкивать однородное с ним и притягивать противоположное". Этот закон Ш. Дюфэ был опубликован в 1733 году в Мемуарах Парижской Академии наук.

Новые открытия в области электричества (особенно изобретение в 1745 году "лейденской банки" – аккумулятора электричества, позволившей выполнять опыты со значительным запасом электричества и с большим эффектом для зрителя) возбудили в человеческом обществе повышенный интерес к электрическим явлениям: электрические опыты демонстрировались в светских салонах, королевских дворцах и на заседаниях научных обществ. Электричество, таким образом, вышло на научно-техническую авансцену нашей цивилизации. За европейскими (прежде всего, английскими и французскими) работами в области электричества последовали соответствующие исследования в Северной Америке и в России. В этих исследованиях электрических явлений, и в особенности атмосферного электричества, заметный вклад для мировой науки внесли такие выдающиеся ученые, государственные и общественные деятели как Веньямин (Бенджамин) Франклин, Георг Рихман и Михаил Ломоносов.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАНКЛИНА В ОБЛАСТИ ИСКУССТВЕННОГО И АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В. Франклин, являющийся не только одним из основателей Северо-Американских Соединенных Штатов, но и по существу основоположником американской науки, родился 17 января 1706 года в г. Бостоне в семье английского эмигранта-мыловара. Несмотря на блестящие способности маленького Веньямина, его родители не смогли дать ему систематического образования и оно ограничилось лишь двумя годами школьного обучения. Веньямину пришлось рано начинать трудовую жизнь. Работая подростком в типографии своего старшего брата, он много читал и активно занимался самообразованием. Когда его ближайший родственник стал издавать газету, он стал пробовать свои силы в журналистике. Повзрослев, В. Франклин в поисках более интересной и доходной для него работы переехал в г. Филадельфию, где организовал свою собственную типографию и развернул широкую общественную деятельность, принесшую ему региональную известность. После долгих лет лишений его трудолюбие и терпение ударов судьбы

привели В. Франклина к долгожданному успеху. Он достиг независимого финансового и обеспеченного материального положения в обществе и стал одним из уважаемых сограждан в г. Филадельфия, входившем в "новом свете" в состав молодого северо-американского государства. Научной работой В. Франклин начал заниматься в зрелом возрасте, когда ему был уже 41 год. Согласно историческим данным наукой он увлекся совершенно случайно – после того, как ему пришлось побывать на популярной лекции (сеансе "чудес физического кабинета") с демонстрационными опытами по электричеству [4]. В. Франклин заинтересовался этими опытами и активно начал самостоятельные исследования в области электричества, проявив при этом блестящий талант физика-экспериментатора. Работы по электричеству, вошедшие в анналы мировой науки, им были сделаны за весьма короткий срок – с 1747 по 1753 годы [4, 5], то есть до работ выдающихся итальянских физиков-электриков Луиджи Гальвани и Алессандро Вольты и наступления эпохи гальванического тока [2].



Веньямин Франклин (1706–1790)

Вначале В. Франклин дал физическое объяснение действию "лейденской банки" – цилиндрического накопителя (конденсатора) электрических зарядов. Затем он изобрел и сконструировал первый плоский электрический конденсатор, состоящий из двух параллельных металлических пластин, разделенных между собой стеклянной прослойкой. Потом В. Франклин на основе проведенных им простых экспериментов с электризованным металлическим чайником, содержащим внутри себя металлическую цепь, установил, что электрический заряд распространяется только по наружной поверхности наэлектризованного

металлического проводника. Далее В. Франклин одним из первых попытался разработать качественную теорию электрических явлений, происходящих при электризации тел. Свою основную научную гипотезу в этой теории, являющейся и до сих пор, в основном, правильной, он изложил в 1749 году в следующем виде [4]: "...*Электрическая материя состоит из частиц крайне малых, способных пронизывать обычные вещества такие плотные, как металл, с такой легкостью и свободой, что они не испытывают заметного сопротивления*". Сейчас эти "крайне малые частицы" мы называем элементарными частицами – электронами. Эта гипотеза исходила из материальной природы электричества. В. Франклин считал, что увеличение этой электрической материи в теле против нормы делает это тело наэлектризованным положительно, а уменьшение – наэлектризованным отрицательно. Проводя соответствующие опыты и экспериментально доказывая справедливость такого подхода в природе электризации тел, он, конечно, тогда не имел возможности количественно оценивать материальный характер электричества и соответственно определять то, кто на самом деле получает электрическую материю и, следовательно, заряжен положительно и кто ее теряет, то есть заряжен отрицательно. Поэтому В. Франклин принял наугад, что наэлектризованное трением стекло заряжено положительно. Введение В. Франклином в теорию электричества таких новых понятий как "положительный и отрицательный электрический заряд", по сравнению со "стеклянным" и "смоляным" электричеством, ранее введенным как мы упомянули выше Ш. Дюфэ, вносило определенность в учение об электричестве и не допускало существования каких-либо других видов электрического заряда. Эти исследования по электричеству составили содержание его основного научного труда "*Новые опыты и наблюдения над электричеством*", состоящего из ряда писем к члену Лондонского Королевского общества Питеру Коллинсону и опубликованного в 1751 году [2, 4].

Только после открытия в 1897 году выдающимся английским физиком Джозефом Томсоном "атомов электричества" – электронов стало известно, что электрическую материю накапливает не положительный электрод, как считал В. Франклин, а отрицательный. В дальнейшем, чтобы не менять привычных обозначений положительной и отрицательной полярности электричества (положительного и отрицательного полюсов), также впервые введенных в физическую науку В. Франклином, электрону приписали отрицательный электрический заряд. Поэтому, наверное, можно предположить, что американский физик В. Франклин своими рассуждениями о "крайне малых частицах", определяющих электризацию физических тел, предвосхитил будущую электронную теорию. Эта теория, как известно, в систематическом изложении впервые была представлена выдающимся голландским физиком-теоретиком Гендриком Лоренцем в 1895 году в своей фундаментальной работе "*Опыт теории электрических и оптических явлений в движущихся телах*" [2, 5].

Основной научной заслугой ученого-самородка В. Франклина, обессмертившей для потомков его имя,

стало открытие им электрической природы веками наблюдаемого человечеством в земной атмосфере явления, называемого молнией. Этому открытию способствовали, прежде всего, ясность и правильность понимания В. Франклином явлений электризации физических тел. Еще в 1747 году В. Франклин высказал предположение о сходстве между электрической искрой, искусственно получаемой в воздухе с помощью электрофорной машины, и молнией, а также между потрескиванием, сопровождающим искусственную электрическую искру, и громовым раскатом, характерным для естественной молнии [5, 6]. Он считал, что молния представляет собой разряд наэлектризованных атмосферных туч друг на друга или на Землю. Следует заметить, что, хотя и до работ В. Франклина высказывалась гипотеза о том, что молния и искровой разряд, искусственно полученный человеком от созданного трением электричества, одно и то же электрическое явление, но разных масштабов, однако экспериментальных доказательств справедливости данной гипотезы до исследований В. Франклина найдено не было. В 1753 году с помощью воздушного бумажного змея, запущенного в грозу и имевшего специальные металлические и изоляционные приспособления, он экспериментальным путем окончательно доказал тождественность земного (искусственного) и атмосферного (естественного) электричества. Эти опыты он демонстрировал при большом стечении любопытных зрителей, получая при этом с помощью атмосферного электричества вблизи земной поверхности электрические искры длиной до 100см [5,7]. Тогда же он впервые установил, что грозовые облака, как правило, бывают заряжены отрицательно [4]. Кстати, современные исследования длинных грозовых электрических искровых разрядов (молний) полностью подтверждают эти опытные данные, полученные В. Франклином еще на "заре" изучения человечеством атмосферного электричества [8].

Поняв сущность мощного грозового электрического искрового разряда, В. Франклин сформулировал перед собой такую техническую задачу: как можно эффективно бороться с разрушениями и пожарами, вызываемыми молнией? В 1750 году В. Франклин на основе результатов своих исследований в области искусственного и естественного электричества предложил весьма простое, но чрезвычайно важное для молниезащиты различных технических объектов изобретение – молниеотвод или как его часто и неправильно называют громоотвод [5]. Технически реализовать молниеотвод автор изобретения предлагал в виде металлического стержня, возвышающегося над защищаемым объектом и хорошо соединенного с землей. Это изобретение базировалось на том положении, что при поражении грозовым разрядом возвышающихся над земной поверхностью объектов необходимо исключить протекание тока молнии по их плохо проводящим конструкциям и предотвратить таким путем быстрое выделение на них энергии больших значений, а заставить его (ток молнии) протекать по хорошо проводящим металлическим элементам. Иначе говоря, пользуясь современной технической терминологией, необходимо было выполнить электриче-

ское шунтирование конструкций защищаемого объекта и отвести по низкоомному пути шунтирования опасный для него (объекта) ток молнии. Это изобретение, на которое В. Франклин принципиально не только не брал патента, но и всячески способствовал его безвозмездному использованию, вызвало вначале у многих крайнее недоверие. Например, члены Лондонского Королевского общества встретили сообщение о "молниеотводе Франклина" насмешками [5]. По этой причине первый молниеотвод в Англии был установлен на Эдистонском маяке лишь в 1760 году. Более активному внедрению и распространению в Англии молниеотводов на технических объектах способствовал вошедший в историю молниезащиты трагический случай, связанный с взрывом от прямого удара молнии порохового склада в английском г. Брешии, в результате которого погибло около 3000 работников и была разрушена значительная часть города. В процессе борьбы за размещение на зданиях и других технических сооружениях молниеотводов против В. Франклина были использованы не только суеверно-религиозные воззрения людей, но и всевозможные неприглядные меры, включая клевету, угрозы и различные инсинуации. На что он спокойно отвечал [4, 6]: "...В вопросах науки правда выявляется только опытом".

В настоящее время молниеотвод Франклина в его различных модификациях – неотъемлемая часть практически всех наших зданий и сооружений [8, 9]. Невозможно подсчитать то количество технических объектов, которое он (молниеотвод) уберег от пагубного воздействия мощных грозовых искровых разрядов. В этом большая заслуга научно-технических идей и разработок выдающегося американского ученого-самоучки В. Франклина. Опыты В. Франклина по электричеству и его изобретение молниеотвода вызвали широкий международный резонанс и способствовали его признанию как крупного ученого. Он был избран членом Лондонского Королевского общества и в 1753 году удостоен его высшей награды – золотой медали Коплея. В 1789 году В. Франклин стал почетным членом Российской Академии наук. Наряду с научной деятельностью, В. Франклин вел активную политическую работу в борьбе Североамериканских колоний за независимость. Он был в 1776 году одним из составителей и редакторов знаменитой "Декларации независимости". Исключительной заслугой В. Франклина было подписание им в 1783 году мирного договора с Англией, в котором признавалась независимость Соединенных Штатов Америки (США). В 1787 году он принимал деятельное участие в выработке конституции США. Умер В. Франклин 17 апреля 1790 года на 84-ом году жизни. В связи со смертью В. Франклина в США 30 дней продолжался траур по выдающемуся ученому – физика и борцу за независимость своей страны.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЯ РИХМАНА В ОБЛАСТИ ИСКУССТВЕННОГО И АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Г. Рихман родился 22 июля 1711 года в эстонском г. Пярну (тогда Пернове). Первоначальное обра-

зование получил в г. Таллине (тогда Ревеле). Затем продолжил свою учебу в германских университетах г. Галле и г. Йене. В 1735 году поступил в университет Петербургской Академии наук по "физическому классу" [2, 5]. Вот как позже написал он о себе и о своих студенческих годах [5]: "...Учился я в том намерении, чтоб со временем моими трудами российскому государству пользу учинить". В 1740 году Г. Рихман был назначен адъюнктом (ученым помощником, являвшимся в России младшей ученой должностью), а в 1741 году стал профессором – академиком физики. С 1744 года и до конца своей трагической гибели в 1753 году Г. Рихман руководил физическим кабинетом Петербургской Академии наук. Наиболее значительными научными работами Г. Рихмана были исследования в области теплоты и электростатики [2, 5].

Собственные опыты по электричеству он начал с 1745 года. К этому времени в мире уже накопился достаточно большой фактический материал в области электростатики: была изобретена электрофорная (электростатическая) машина, создана "лейденская банка" – первый конденсатор электричества, была известна противоположность действия положительного ("стеклянного") и отрицательного ("смоляного") электричества, установлено явление стекания электрического заряда с острия электрода.



Георг Рихман (1711–1753)

Несмотря на все вышеуказанное, исследования электрических явлений в ведущих научных лабораториях (физических кабинетах) в то время в подавляющем большинстве носили чисто качественный (описательный) характер. Большой личной заслугой Г. Рихмана явилось то, что он с первых своих электрических опытов встал на путь количественного исследования

"электрической силы". В 1745 году им был изобретен электроизмерительный прибор, который он назвал "электрическим указателем" [2, 5]. Данный прибор имел металлическую линейку, свободно висящую вдоль нее льняную нить и дуговую шкалу, разделенную на градусы. Электрический заряд сообщался линейке и измерялся углом отклонения нити, вес которой в процессе опытов сохранялся одинаковым. Заметим, что на принципе работы этого "электрического указателя Рихмана" основано действие и современного относительного электрометра. Описание этих электрических экспериментов Г. Рихмана было опубликовано в "Новых Комментариях" Петербургской Академии наук лишь в 1751 году, то есть спустя шесть лет после начала опытов. Важно подчеркнуть, что это была первая публикация по электричеству в России [2, 10]. Г. Рихман ясно понимал, что "...совершенный электрометр должен оказать большую пользу в деле открытия и определения законов электричества" [2].

В том же 1745 году Г. Рихманом был создан прибор для измерения электрического заряда с помощью весов. Принцип действия этого прибора (электростатическое притяжение одной чаши весов к наэлектризованной металлической плите уравновешивалось грузом на другой чаше весов) нашел свое дальнейшее развитие в современном абсолютном электрометре. С помощью разработанных несовершенных с сегодняшних позиций "электрических указателей" Г. Рихман в 1753 году опытным путем нашел, что [2]: "...Электрическая материя, неким движением возбуждаемая вокруг тела, по необходимости должна опоясывать его на некотором расстоянии: на меньшем расстоянии от поверхности тела действие ее бывает сильнее. Следовательно, при увеличении расстояния сила ее убывает по некоторому, пока еще неизвестному закону".

Таким образом, Г. Рихман при помощи своих примитивных, глядя с нынешних научных вершин, "электрических указателей" по существу открыл существование электрического поля вокруг заряженного тела, напряженность которого убывает с увеличением расстояния от тела "по некоторому, пока еще неизвестному закону". Иначе говоря, русскому ученому-физику Г. Рихману принадлежит честь открытия электрического поля и вполне определенное утверждение о том, что действие этого поля зависит от расстояния до источника самого поля.

Отметим, что этот "пока еще неизвестный закон" взаимодействия электрических зарядов был установлен только в 1785 году выдающимся французским физиком Шарлем Кулоном. Согласно этому фундаментальному закону природы, открытому опытным путем с помощью электрических крутильных весов, сила взаимодействия двух неподвижных электрических зарядов прямо пропорциональна "...зарядам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними" [2, 5]. Принимая во внимание приведенную выше идею Г. Рихмана об электрическом поле, можно с определенной долей уверенности констатировать, что русский академик-физик Г. Рихман предвосхитил будущую теорию электромагнитного поля великих английских физиков Майкла Фарадея и

Джеймса Максвелла, математически разработанную последним, в наиболее полном виде, к 1873 году [11]. В соответствии с известными историческими данными Г. Рихману принадлежит заслуга и в открытии явления электростатической индукции, то есть явления электризации тел на расстоянии [5]. Впервые подобная идея была высказана ранее нами уже упомянутым английским ученым-физиком Р. Бойлем. Но его идея до работ Г. Рихмана не была подтверждена экспериментально. Кроме того, Г. Рихманом было установлено явление электризации различных металлических тел от трения.

В 1752 году Г. Рихман, узнав об экспериментальных работах американского ученого В. Франклина по атмосферному электричеству, приступил к исследованию мощных грозовых разрядов. Для этой цели им был сконструирован специальный "электрический указатель", приведенный нами на рис. 1 Г. Рихманом в 1752 году совместно с академиком-физиком М. Ломоносовым была сконструирована так называемая ими "громовая машина" – большой электроскоп, улавливавший во время грозы электрические заряды (искровые разряды – молнии) с воздушной атмосферы и передававший их по металлическому стержню в измерительную лабораторию, оснащенную изображенным на рис. 1 специальным "электрическим указателем". Проведенные Г. Рихманом экспериментальные исследования грозовых искровых разрядов подтвердили тождество "электрической материи" и "громовой материи".

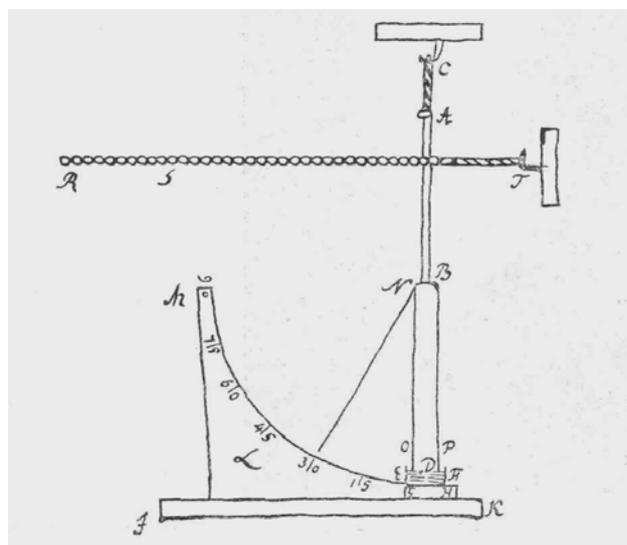


Рис. 1. Электрический указатель Рихмана, применявшийся в XVIII столетии при исследовании молнии (рисунок самого Г. Рихмана)

В том же 1752 году для усиления действия "громовой машины" он соединил ее с большой "лейденской банкой". Г. Рихман в изучении молнии и защите от нее людей и наземных сооружений видел задачу большой государственной важности. Используя идеи В. Франклина, он тем не менее самостоятельно разрабатывал конструкции молниеотводов и испытывал их действие в реальной работе. В 1753 году Г. Рихман в своей, как оказалось в дальнейшем последней, печатной научной работе "Рассуждение об указателе

электричества и о пользовании им при исследовании явлений искусственного и естественного электричества" подвел определенные итоги своим многолетним экспериментальным работам по исследованию электрических явлений, включая исследования электрической природы молнии.

Опыты Г. Рихмана и М. Ломоносова в области атмосферного электричества вызвали большой интерес в России. Отчет об этих исследованиях и полученных при этом результатах на публичном собрании Петербургской Академии наук был поставлен на 6 сентября 1753 года. Однако 6 августа 1753 года во время количественного измерения на "громовой машине" электрического заряда от грозового искрового разряда Г. Рихман в самом расцвете творческих сил был убит прямым высоковольтным электрическим разрядом в голову. Внезапная смерть академика Г. Рихмана на 43-ом году его жизни повергла в уныние научную общественность как в России, так и на Западе и на долгие годы приостановила активные исследования в России атмосферного электричества.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОМОНОСОВА В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Корифей российской науки и один из самобытных гениев в истории мировой культуры М. Ломоносов родился 20 ноября 1711 года в деревне Мишанинская (вблизи Холмогор) Архангельской губернии в семье крестьянина-помора [2, 5]. Молодой талантливый юноша после долгих мытарств, учебы с 1731 по 1736 годы в Заиконоспасской духовной академии в г. Москве (тогдашнее высшее учебное заведение России) и пятилетней учебы-стажировки с 1736 года за границей (в Германии и Голландии) вернулся в Россию в 1741 году уже возмужавшим и сложившимся ученым со своими научными взглядами и принципами. С этого времени и до конца своих дней он активно трудился в г. Петербурге над "процветанием наук в России". Его научная работа была поистине всеобъемлюща. Исторически известно, что одной из наиболее важных научных заслуг М. Ломоносова является формулировка им в 1748 году и экспериментальное доказательство в 1756 году принципа (закона) сохранения материи и движения задолго до установления этого всеобщего закона природы в 1774 году знаменитым французским химиком Лавуазье [2, 5]. В области физики первый русский профессор и академик Петербургской Академии наук оставил после себя ряд важных для мировой науки работ по кинетической теории газов, теории теплоты, оптике, гравитации, физике земной атмосферы и атмосферы Венеры, физическим явлениям на поверхности Солнца и электричеству [2, 4]. Главный интерес в области электричества М. Ломоносов проявил к вопросам, связанным с атмосферным электричеством.

Ему были известны результаты электрических опытов его современника – американского физика В. Франклина в области атмосферного электричества. Им совместно со своим другом академиком Г. Рихманом был проделан ряд экспериментов на указанной нами выше "громовой машине". После трагической гибели на этой "машине" Г. Рихмана он в 1753 году

написал [5]: "...Не думаю, чтобы внезапным поражением нашего Рихмана натуру испытующие умы устарились и электрической силы в воздухе законы изведывать перестали".



Михаил Ломоносов (1711–1765)

На основании данных этих совместных опытов М. Ломоносов попытался построить теорию атмосферного электричества, в частности, теорию явления грозы. Согласно этой теории причиной возникновения электричества в земной атмосфере он считал трение между восходящими теплыми и нисходящими холодными потоками воздуха, содержащими мелкодисперсную влагу (воду). Кстати, такой точки зрения, в основном, придерживаются и авторы современных теорий атмосферного электричества, тепловых и фронтальных гроз, рассматривающие молнию как разновидность высоковольтного электрического газового разряда при очень большой длине искры [12]. Отметим здесь и то обстоятельство, что сам физический механизм возникновения электрического заряда в атмосферных облаках является настолько сложным, что он и до сих пор находится на стадии углубленного изучения, анализа и детального уточнения. Не безынтересен тот факт, что первый молниеотвод в России установил М. Ломоносов в г. Петербурге на своем жилом доме [5].

Не менее интересным научно-историческим фактом является то, что в 1753 году на заседании Петербургской Академии наук М. Ломоносов в качестве одной из конкурсных академических задач выдвинул такую научную тему [5]: "...Сыскать подлинную электрической силы причину и составить точную ее теорию". По условиям этого конкурса сам М. Ломоносов не мог принять в нем участие. Однако он в сво-

ем сочинении от 1753 года "Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих", а еще более четко в своей работе от 1756 года "Теория электричества, изложенная математически", высказал оригинальные мысли о природе возникновения искусственного и естественного электричества [5, 13]. В этих научных работах он его (электричества) происхождение связывал с движением микроскопических частиц эфира. Для М. Ломоносова не осталось в стороне и изучение поражающих человеческое воображение северных полярных сияний. В 1753 году он в своей работе "Сообщение о наблюдениях, подтверждающих электрическую природу северного сияния" впервые в мире указал на электрическую природу этого крупномасштабного атмосферного явления и оценил высоту над Землей этих сияний [5, 14].

Говоря об М. Ломоносове как об ученом-физике, нельзя не отметить его великой роли как организатора науки в России. Он был зачинателем многих научных экспедиций, много сил и энергии отдавал делу просвещения в России. Бессмертным памятником Михаилу Васильевичу Ломоносову стал созданный им Московский государственный университет. За свои научные заслуги он – член Петербургской Академии наук был избран иностранным членом Шведской Академии наук и почетным членом Болонской Академии наук (Италия). Многолетняя кипучая научная и общественная деятельность и особенно борьба против "недругов наук российских" надломили физические силы М. Ломоносова. Скончался он безвременно 15 апреля 1765 года на 54-ом году жизни.

##### 5. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Последние десятилетия исследования молнии и эффектов ее сопровождающих в ведущих мировых научных центрах определялись, прежде всего, практическими соображениями, направленными на необходимость обеспечения молниезащиты таких крайне важных для человеческого общества технических объектов как летательные аппараты (ракетно-космические системы, самолеты, вертолеты), средства электрической связи и электроэнергетические системы, включая нетрадиционные (альтернативные) источники электрической энергии – ветрогенераторы, со своим высоко- и низковольтным электрическим оборудованием, размещенным как на поверхности земли, так и расположенным высоко над ней [8, 15-24].

Как известно, в настоящее время в мире существуют три основных способа молниезащиты технических объектов [8, 25]. Это, во-первых, токоотвод от защищаемого объекта атмосферного электричества. Во-вторых, это экранирование защищаемых объектов и, в-третьих, это ограничение токов и напряжений, вызванных в электрических цепях оборудования защищаемых объектах воздействием на них как дальних, так и прямых ударов молнии.

Токоотвод молнии от технических объектов обычно обеспечивается при помощи пассивных (по существу стержневых или тросовых молниеотводов Франклина) [9, 26] или активных [27] заземленных

молниеотводов (молниеприемников). Последний тип молниеотвода появился на рынке электротехнологий совершенно недавно. Он имеет значительно большую, чем у пассивного молниеотвода стоимость и сейчас весьма активно проходит тестирование во многих странах, включая Украину. По одним сведениям [27] ряд конструкций таких молниеприемников (например, серия *Satelit-3 ESE 6000*) характеризуется повышенной эффективностью и существенно расширенной зоной защиты по сравнению с пассивным штыревым (стержневым) молниеотводом. Кстати, сейчас только Франция имеет свой стандарт NF C17.102-1995, который регламентирует использование на практике таких типов активных молниеприемников [27]. По другим сведениям [28] вопросы эффективности и правомерности применения на ответственных технических объектах активных молниеприемников у специалистов – высоковольтников вызывают сомнения и нуждаются в дальнейшем в более аргументированном и весомом экспериментальном подтверждении. С обоснованной критикой активных молниеотводов, базирующихся, по мнению их изобретателей, на эмиссии с помощью их элементов встречного к облаку электрического лидера, выступают и ведущие в области физики молнии ученые США [29]. К этому следует добавить то, что в последнее время в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" стали проводиться фундаментальные исследования, направленные на разработку теории, описывающей процессы развития канала молнии и ориентировки лидера молнии при приближении ее (молнии) к земле и соответственно к защищаемому техническому объекту [30, 31]. По-видимому, эти работы будут способствовать прояснению вопроса об эффективности активных молниеприемников.

Что касается экранирования технических объектов, то этот метод молниезащиты может быть с успехом использован как путем размещения всего защищаемого объекта в цельнометаллическом корпусе (защитном экране), так и его отдельных частей, содержащих электронное, радио – и электротехническое оборудование, слабоустойчивое к внешним мощным импульсным электромагнитным полям, большим импульсным токам и высоким импульсным напряжениям и поэтому особо подвергаемое пагубному воздействию молнии [8, 25]. При этом особое внимание должно уделяться надежному и эффективному заземлению наружных металлических оболочек (брони) вводимых в технический объект и выводимых из него кабелей (электропитания, управления и связи) и защитных экранов [8, 32, 33]. Как правило, от качества системы заземления элементов защищаемого объекта в значительной мере зависит и эффективность всей системы его молниезащиты [8, 23].

Ограничение в электрических цепях защищаемого объекта токов и напряжений, индуцируемых в них при прямом ударе в него молнии или обусловленных заносом при дальних ударах молнии высоких электрических потенциалов в объект по кабелям (проводам) электропитания, линиям электросвязи, другим токопроводам и коммуникационным металлоконструкциям, извне подключенным к объекту, является неотъемлемой составной частью современной систе-

мы защиты технического объекта от вредного действия молнии. Данное ограничение токов и напряжений может включать в себя, прежде всего, использование в силовых цепях электропитания и слаботочных цепях управления объекта грозозащитных фильтров и импульсных ограничителей разработки НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" [34]. Далее для снижения бросков напряжения (тока) в линиях электросвязи и на электроэлементах других цепей объекта могут применяться разработанные с активным участием сотрудников НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" блоки пассивной грозозащиты, содержащие несколько ступеней ограничения перенапряжений, вызванных действием электромагнитных (полевых) и токовых факторов молнии [24, 35]. Данные блоки пассивной грозозащиты могут комплектоваться, в частности, первой ступенью ограничения, содержащей защитные искровые разрядники (например, типа LSA140), которые закорачивают соответствующие цепи на землю. Вторая ступень ограничения этих блоков может содержать ограничители напряжения, выполненные на основе твердотельных металлооксидных дисковых варисторов (например, типа FNR 07K820). Третья ступень ограничения рассматриваемых блоков пассивной грозозащиты может выполняться на базе ограничительных быстродействующих диодов (например, однопроводных трансил – диодов типа 1,5KE6,8A). Экспериментальная проверка работоспособности данных блоков пассивной грозозащиты, включенных при испытаниях, как в режиме воздействия дальнего, так и прямого удара апериодического импульса тока молнии временной формы 2/50мкс и амплитудой 30кА, в реальную интерфейсную кабельную линию связи типа RS-485 силового радиотехнического оборудования подтвердила их высокую надежность и эффективность [24].

В заключение этого раздела следует указать то, что в настоящее время НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" располагает комплексом отечественного высоковольтного электрофизического оборудования наружной установки и размещенного внутри отапливаемого помещения, с помощью которого могут проводиться полномасштабные испытания систем молниезащиты и грозозащищенности многообразных крупно – и малогабаритных технических объектов, содержащих в своем составе электроэнергетическое, радиоэлектронное и электротехническое оборудование как с высоковольтными, так и низковольтными устройствами и электрическими цепями различного исполнения [36-41]. Схемно-технические решения этих уникальных по своим техническим характеристикам высоковольтных испытательных установок и их отдельных устройств и элементов защищены рядом изобретений Украины [42-48].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. - М.: Русские словари, 2004.- 957 с.
- [2] Кудрявцев П.С. Курс истории физики.- М.: Просвещение, 1974.- 312 с.
- [3] Штекли А.Э. Галилей/ Серия: Жизнь замечательных людей. - М.: Молодая гвардия, 1972.- 384с.
- [4] Капица П.Л. Жизнь для науки.- М.: Знание, 1965.- 63с.
- [5] Выдающиеся физики мира. Рекомендательный указатель.- М.: Типография б-ки им. В.И. Ленина, 1958.- 435 с.
- [6] Капица П.Л. Научная деятельность В. Франклина// Успехи физических наук.- 1956.-т. 58.- вып. 2.- С.169-182.
- [7] Стекольников И.С. Вениамин Франклин. К 250-летию со дня рождения// Электричество.- 1956.- №1.- С.75-78.
- [8] Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards// Proceeding of the IEEE.-1988.- Vol.76.- №12.- p. 1548-1565.
- [9] Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД 34.21.122-87/ Минэнерго СССР.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 56 с.
- [10] Кравец Т.П., Радовский М.И. К 200-летию со дня смерти академика Г.В. Рихмана// Успехи физических наук.- 1953.- т.51.- вып.2.- С. 287-299.
- [11] Баранов М.И. Джеймс Клерк Максвелл и теория электромагнитного поля// Электротехніка і електромеханіка.-2005.- №1.- С. 5-7.
- [12] Техника высоких напряжений/ Под ред. М.В. Костенко.- М.: Высшая школа, 1973.- 528 с.
- [13] Федоров Е.К. "Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих" Ломоносова и современное представление об атмосферном электричестве// Известия АН СССР. Серия "Геогр. и геофиз.".1950.- №1.- С. 25-36.
- [14] Радовский М.И. Ломоносов и его исследования в области атмосферного электричества// Электричество.- 1939.- №1.- С. 69-72.
- [15] Isakova A.V., Kravchenko V.I., Makeev V.G. Investigation of Damages Pattern in Dielectric Radomas of Flying Vehicles Struck by the Lightning // Proceeding of the 6-th European Electromagnetic Structures Conference, Friedrichshafen (FRG).- 1991. -p. 277-285.
- [16] Borisov R.K., Larionov V.P., Avakyan H.O., Mitrofanova T.A. and others. Investigation of Shielding Properties of Polymeric Composites// Proceeding of the 6-th European Electromagnetic Structures Conference, Friedrichshafen (FRG). -1991. -p. 49-58.
- [17] Baranov M.I., Isakova A.V., Kravchenko V.I. The experimental investigation of electrothermal effects produced by spark channel of a lightning on the metal sheathing of the flying objects// Proceeding 24<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection, Birmingham (Great Britain).- 1998.-Paper №282.
- [18] Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата// Технічна електродинаміка.-1999.- №1.- С. 16-21.
- [19] Баранов М.И., Даценко В.П., Колиушко Г.М. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в землю// Технічна електродинаміка.-2001.- №4.- С. 9-14.
- [20] Баранов М.И., Даценко В.П., Колиушко Г.М. Расчет двумерного импульсного электромагнитного поля в земле при прямом ударе в нее молнии// Технічна електродинаміка.-2002.- №3.- С. 13-18.
- [21] Баранов М.И., Белозеров В.В., Кравченко В.И., Махатилова А.И. Экспериментальные исследования электротеплового воздействия импульсного сильноточного искрового разряда на металлическую обшивку летательного аппарата// Технічна електродинаміка.-2003.- №1.- С. 3-7.
- [22] Баранов М.И. Расчет кратера электротеплового разрушения на металлической обшивке летательного аппарата при прямом ударе в нее молнии// Электротехніка і електромеханіка.-2003.- №4.- С. 101-103.

- [23] Борисов Р.К., Кравченко В.И., Колиушко Г.М., Князев В.В. Новые аспекты молниезащиты объектов// *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск.*-2004.- С. 109-112.
- [24] Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К., Ниженко Б.И. и др. Экспериментальное исследование грозозащищенности интерфейсной линии связи RS-485 при воздействии на нее больших импульсных токов молнии// *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.*- Харків: НТУ "ХПІ".-2004.- №35.- С. 115-123.
- [25] Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств.- М.: Радио и связь, 1991.-264 с.
- [26] Инструкция по проектированию молниезащиты радиообъектов. ВСН-1-77 Минсвязи СССР.- М.: Связь, 1978.- 32 с.
- [27] Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П. Тестирование активных молниеприемников// *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.*- Харків: НТУ "ХПІ".-2003.- №1.- С. 80-88.
- [28] Шостак В., Баранник Є. 27 Міжнародна конференція з блискавкозахисту ICLP-2004 (м. Авіньйон, Франція)// *Електропанорама.*-2005.- №1-2.- С. 6-8.
- [29] Uman M.A., Rakov V.A. Critical Review of Nonconventional Approaches to Lightning Protection// *American Meteorological Society.*-December 2002.-№12.- p.1809-1820.
- [30] Князев В.В., Резинкина М.М., Кравченко В.И., Щерба А.А. Основные направления развития современных методов молниезащиты// *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.*- Харків: НТУ "ХПІ".-2004.- №35.- С.102-111.
- [31] Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. Статистическая модель процесса ориентировки лидера молнии на наземные объекты// *Журнал технической физики.*-2005.- т.75.- вып.9.- С. 44-51.
- [32] Базуткин В.В., Борисов Р.К., Горшков А.В., Колечицкий Е.С. Оценка параметров заземлителей при воздействии импульсных токов// *Электричество.*-2002.- №6.- С. 6-12.
- [33] Борисов Р.К., Петров С.Р., Смирнов М.Н., Янковский Б.Д. Экспериментальные исследования заземлителей молниезащиты при воздействии импульсных токов// *Электро.*-2004.- №1.- С. 13-16.
- [34] Baranov M.I., Ignatenko N.N., Kolobovsky A.K. Protective structures of electropower objects from an effect of powerful electromagnetic disturbances// *Proceeding 26<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection, Cracow (Poland).*-2002.- Paper №7p.2.- p. 612-614.
- [35] Патент №8396 Україна, МПК H02H9/04. Пристрій для захисту від імпульсних перенапруг/ М.І. Баранов, М.М. Ігнатенко, А.К. Колобовський, Б.І. Нізієнко, В.О. Шевченко, О.В. Шевченко (Україна).- №20040807150; Заявлено 30.08.04; Надрук. 15.08.05; Бюл. №8.- 5 с.
- [36] Баранов М.И., Бочаров В.А., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования// *Електротехніка і електромеханіка.*-2003.- №2.- С. 75-80.
- [37] Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябка Ю.П., Мельников П.Н. Комплекс электрофизического оборудования для генерирования микро- и миллисекундных импульсов напряжения до 1,2 МВ и тока до 200 кА// *Технічна електродинаміка.*-2003.- №5.- С. 55-59.
- [38] Баранов М.И., Колиушко Г.М., Колобовский А.К., Кравченко В.И. Комплекс высоковольтного испытательного электрофизического оборудования экспериментальной базы НИПКИ "Молния" НТУ "ХПІ" // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.*- Харків: НТУ "ХПІ".-2004.- №4.- С. 3-13.
- [39] Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Экспериментальная установка с двумя замыкателями нагрузки для получения больших апериодических импульсных токов молнии// *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ.*- Кременчук: КДПУ, 2003.- Вип. 4 (21).- т.1.- С. 10-12.
- [40] Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Применение мощных генераторов импульсных напряжений в схеме с замыкателем нагрузки для получения больших импульсных токов молнии// *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка.*- Харків: НТУ "ХПІ".-2004.- №4.- С. 37-45.
- [41] Баранов М.И., Игнатенко Н.Н. Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг.*- Харків: НТУ "ХПІ".-2005.- №49.- С. 3-14.
- [42] Патент №6279 Україна, МПК H03K3/53. Генератор импульсных струмів/ М.І. Баранов, М.М. Ігнатенко, А.К. Колобовський (Україна).- №2003087824; Заявлено 19.08.03; Надрук. 16.05.05; Бюл. №5.- 3 с.
- [43] Патент №63747А Україна, МПК H03K3/53. Генератор імпульсних струмів/ М.І. Баранов, М.М. Ігнатенко, А.К. Колобовський (Україна).- №2003065338; Заявлено 10.06.03; Надрук. 15.01.04; Бюл. №1.- 4 с.
- [44] Патент №63747 Україна, МПК H03K3/53. Генератор імпульсних струмів/ М.І. Баранов, М.М. Ігнатенко, А.К. Колобовський (Україна).- №2003065338; Заявлено 10.06.03; Надрук. 15.08.05; Бюл. №8.- 4 с.
- [45] Патент №63749А Україна, МПК H01T9/00. Високовольтний повітряний розрядник/ М.І. Баранов, М.М. Ігнатенко, А.К. Колобовський (Україна).- №2003065356; Заявлено 10.06.03; Надрук. 15.01.04; Бюл. №1.- 3 с.
- [46] Патент №63749 Україна, МПК H01T9/00. Високовольтний повітряний розрядник/ М.І. Баранов, М.М. Ігнатенко, А.К. Колобовський (Україна).- №2003065356; Заявлено 10.06.03; Надрук. 15.08.05; Бюл. №8.- 3 с.
- [47] Патент №8362 Україна, МПК H03K3/53. Генератор великих імпульсних струмів/ М.І. Баранов, М.М. Ігнатенко, А.К. Колобовський (Україна).- №20040403168; Заявлено 27.04.04; Надрук. 15.08.05; Бюл. №8.- 4 с.
- [48] Патент №8397 Україна, МПК H03K3/53. Установка для формування струму блискавки/ М.І. Баранов, М.М. Ігнатенко, А.К. Колобовський (Україна).- №20040807164; Заявлено 30.08.04; Надрук. 15.08.05; Бюл. №8.- 3 с.

*Поступила 11.01.2006*

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ

Болух В.Ф., д.т.н., проф.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Общая электротехника"

тел. (057) 70-76-427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

*Розглянуті шляхи і напрями підвищення ефективності лінійних електромеханічних перетворювачів імпульсної дії за рахунок конструктивних удосконалень, кріогенного охолодження рідким азотом, синтезу оптимальних параметрів і конфігурацій активних елементів та застосування багатосекційних конструкцій з послідовною комутацією секцій індуктора. Запропонована класифікація цих перетворювачів по конструктивним ознакам.*

*Рассмотрены и проанализированы пути и направления повышения эффективности линейных электромеханических преобразователей импульсного действия за счет конструктивных усовершенствований, криогенного охлаждения жидким азотом, синтеза оптимальных параметров и конфигураций активных элементов и применения многосекционных конструкций с последовательной коммутацией секций индуктора. Предложена классификация этих преобразователей по конструктивным признакам.*

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития электромеханики являются линейные электродвигатели, обеспечивающие разгон массогабаритных объектов до высокой скорости [1,2]. Особенность их конструктивных схем состоит в том, что двигатель и ускоряемый исполнительный элемент (ИЭ), как правило, объединены в единую систему, образуя электро-механический преобразователь линейного движения. В качестве ИЭ может выступать как активная часть механической системы, в которую встроены преобразователь, например, поршень, клапан, замыкающий контакт, ударник и т.д., так и отдельный объект, например, испытательное устройство, пусковой предмет и др. Непосредственное соединение якоря двигателя с ИЭ лишает электро-механический преобразователь универсальности, поскольку данный элемент в силу функциональных особенностей и характера нагрузки определяет величину рабочего хода, силу ударного воздействия и скорость линейного перемещения, что требует особого внимания при его проектировании. Одними из наиболее перспективных в данном классе устройств являются линейные электро-механические преобразователи импульсного действия (ЛЭПИД). Однако при работе в импульсном режиме с быстрым изменением электромагнитных, механических и тепловых характеристик в течение рабочего цикла, эффективность известных преобразователей недостаточно высока [3].

Целью статьи является обобщение путей совершенствования и повышения эффективности ЛЭПИД.

В качестве направлений совершенствования ЛЭПИД можно выделить: конструктивный, криогенное охлаждение, синтез оптимальных параметров и конфигураций активных элементов, применение многосекционных конструкций, использование различных систем возбуждения и источников энергии. Рассмотрим основные технические реализации указанных подходов.

### КРИОГЕННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных путей совершенствования ЛЭПИД является криогенное охлаждение индуктора и якоря [4,5]. Для этих целей целесообразно использовать жидкий азот, который обладает высокими диэлектрическими показателями и является безопасным, относительно дешевым и доступным хладагентом, позволяя многократно понизить активное сопротивление токовых элементов. За счет этого обеспечивается повышение добротности электромагнитной системы ЛЭПИД и происходит возрастание токов в индукторе и якоре в импульсном режиме. Как результат – понижаются потери, увеличиваются электродинамические усилия (ЭДУ), действующие на якорь, и повышается его скорость.

Эффективность электро-механического преобразователя целесообразно оценивать параметрами  $\eta_p$  и  $\eta_f$ , которые учитывают, соответственно, кинетическую энергию и потери, а также импульс ЭДУ и энергию емкостного накопителя [5]:

$$\eta_p(t) = \frac{(m_2 + P)v^2(t)}{(m_2 + P)v^2(t) + 2 \sum_{n=1}^2 \int_0^{t_p} i_n^2(t) R_n(T_n, B_n) dt} ;$$

$$\eta_f(t) = \frac{1}{U_0^2 C \cdot (m_2 + P)} \left( \int_0^{t_p} f_z(t) dt \right)^2 ;$$

где  $m_2$  – масса якоря;  $P$  – масса ускоряемого ИЭ;  $V$  – скорость якоря вдоль оси  $z$ ;  $i_n$ ,  $R_n$ ,  $T_n$ ,  $B_n$  – ток, сопротивление, температура и индукция магнитного поля  $n$ -ого элемента ( $n=1, 2$  – индексы индуктора и якоря);  $U_0$ ,  $C$  – напряжение и емкость источника энергии;  $t_p$  – продолжительность импульса ЭДУ;  $f_z$  – ЭДУ, действующие на якорь, равные

$$f_z(t, z) = i_1(t) \cdot i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z) ;$$

$M_{12}(z)$  – взаимоиנדуктивність между индуктором и якорем.

На рис.1 показана динамика изменения параметров  $\eta_p$  и  $\eta_f$  в течение рабочего цикла, откуда следует,

что криогенное охлаждение существенно повышает эффективность преобразования энергии в ЛЭПИД.

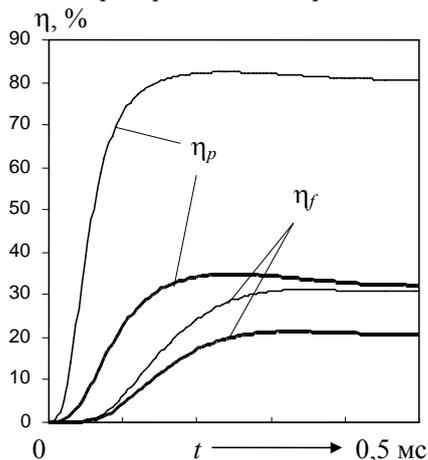


Рис.1. Показатели эффективности ЛЭПИД при комнатной температуре (жирные линии) и при криогенном охлаждении (тонкие линии)

Однако наличие низкотемпературного хладагента обуславливает применение специального криостата, что усложняет конструкцию ЛЭПИД и требует новых конструктивных решений. Криостат должен быть выполнен из немагнитного слабо проводящего материала и не испытывать механических нагрузок от ЭДУ. В качестве примера использования криогенного ЛЭПИД рассмотрим конструктивную схему технологической установки, предназначенной для очистки оборудования, например трюма, от остатков налипших материалов повышенной вязкости (рис.2).

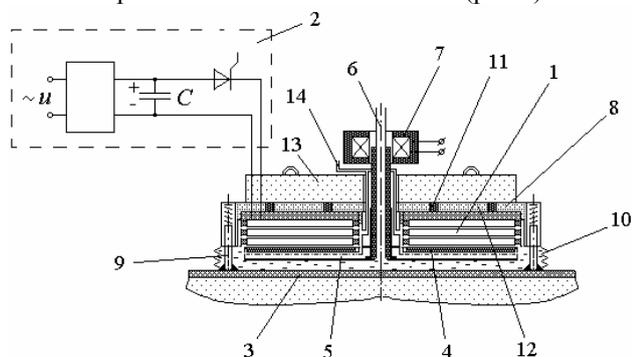


Рис.2. Схема технологической установки для очистки оборудования от остатков вязких материалов

Установка содержит индуктор 1 с радиальными каналами для охлаждения, возбуждаемый от импульсного источника 2. Между индуктором 1 и поверхностью очищаемого оборудования 3 расположен подвижный якорь 4, к внешней поверхности которого присоединена ударная пластина 5. Направляющий стержень 6 соединяет якорь 4 с электромагнитом 7 возвратного механизма. Внешний корпус 8 выполнен из теплоизоляционного материала, например пенопласта, покрытого тонким листом нержавеющей стали. Контактные элементы подпружиненного цилиндра 9 соединены с корпусом криостата внешним гофрированным кожухом 10, выполненным, например, из герметичного стекловолокна или металлического

сильфона. В корпусе 8 установлены упорные теплоизоляционные элементы 11, которые соединяют опорную пластину 12 криостата с внешним диском 13, находящемся при температуре окружающей среды. Через центральное отверстие направляющего стержня 6 в установку подается криогенный хладагент, а выход использованного газа осуществляется через патрубок 14. В целом представленная криогенная установка довольно конструктивна и технологична, что делает ее не намного сложнее аналогичной охлаждаемой "теплой" установки, работающей при температуре окружающей среды.

## СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ И КОНФИГУРАЦИЙ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Иным эффективным путем повышения эффективности ЛЭПИД является синтез параметров его активных элементов, обеспечивающих для заданной нагрузки и энергии источника максимальную эффективность работы при определенных условиях, например, минимальных превышениях температур и заданном объеме проводникового материала для индуктора и якоря. Синтез параметров осуществляется путем применения оптимизационного алгоритма, в котором используется нахождение минимума целевой функции  $m$  переменных в поисковом пространстве. В алгоритме совместно используется глобальный метод оптимизации, осуществляющий случайный поиск параметров преобразователя в заданном пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локальный метод, обеспечивающий стягивание области параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров. В качестве метода глобальной оптимизации применяются генетические алгоритмы, относящиеся к методам оптимального проектирования нового поколения [6]. По данному методу, оперируя совокупностью (популяцией) возможных решений  $P = (x_1, \dots, x_m)$ , обрабатывается набор параметров  $x$ , структурированный определенным образом в виде цепочки конечной длины, а последующие поколения популяции решений генерируются с помощью генетических операторов. Здесь реализуется случайный поиск с централизованным управлением, использующий отбор и генетические механизмы воспроизводства, при произвольном выборе точек приложения операторов. Формально используемый генетический алгоритм можно записать в виде

$$P_{k+1} = \Gamma A(P_k, N, S^*, C^*, M^*, I_\Lambda, \Lambda, t^*),$$

где  $P_k$  - популяция на  $k$ -ом шаге;  $N$  - размер популяции;  $S^*$  - оператор отбора;  $C^*$  - оператор кроссовера;  $M^*$  - оператор мутации;  $\Lambda$  - метод локальной оптимизации;  $I_\Lambda$  - критерий включения локального метода;  $t^*$  - критерий окончания.

Операторы  $S^*$ ,  $C^*$  и  $M^*$  используют вероятностное распределение. При использовании оператора отбора  $S^*$  в каждой итерации алгоритма популяция  $P_k$  сортируется в порядке возрастания целевой функции  $f(x_i^k)$ . Затем два отобранные варианта ("особи") обрабатываются операторами мутации  $M^*$  и кроссовера  $C^*$ . При использовании оператора кроссовера  $C^*$  на линии

раздела двух цепочек варьируемых параметров случайным образом выбирается точка раздела и части, расположенные, например, слева от этой точки, меняются местами, образуя два новых варианта ("потомка"), каждый из которых содержит части первоначальных ("родительских") цепочек параметров, замещающая варианты с низкими показателями. Для предотвращения преждевременного стягивания вариантов в локальном экстремуме используется оператор мутации  $M^*$ , который действует на цепочки параметров, выбранные случайным образом, изменяя случайным образом выбранный небольшой фрагмент.

В качестве метода локальной оптимизации параметров преобразователя используется метод деформируемого многогранника [7]. По этому методу в пространстве параметров  $\mathfrak{R}^n$  случайным образом иницируется популяция точек  $x_i, i=1, \dots, n+1$  (вершины многогранника), при этом каждая точка представляет собой вектор параметров  $x=(x_1, \dots, x_n)$ . Они отображаются на пространство целевой функции  $f(x)$  и на текущем шаге  $t$  определяются вершины с наибольшим и наименьшим значениями целевой функции,  $f_{\max}(x'_{\max})$  и  $f_{\min}(x'_{\min})$ . Новая точка  $z^t$  формируется путем отражения наихудшей вершины  $w^t = x'_{\max}$  с максимальным значением целевой функции относительно центра масс  $c$  всех остальных вершин. В новой точке  $y^t = 2c^t - w^t$  вычисляется значение целевой функции  $f(y^t)$  и, в зависимости от сравнения полученной величины со значением целевой функции в наилучшей вершине с минимальным значением целевой функции, многогранник деформируется относительно своего исходного состояния: он претерпевает либо растяжение к точке  $z^t = 2y^t - c^t$ , либо сжатие к точке  $z^t = 0,5(c^t + w^t)$ , либо редукцию, когда его вершины заменяются точками  $0,5(x'_i + x'_{\min})$ . Поскольку процедура деформации многократно повторяется, то многогранник адаптируется к локальному рельефу целевой функции и сжимается, обеспечивая сходимость алгоритма в локальном минимуме, позволяя по размерам многогранника  $\sigma$ , судить о стадии поиска параметров оптимального преобразователя.

При синтезе параметров требуем, чтобы потери в индукторе и якоре ЛЭПД при фиксированной энергии источника были минимальными, обеспечивая максимальную эффективность ускорения, минимальные превышения температур обмоток  $\theta_n$  и наименьшую массу индуктора. В таком случае при заданных критериальных ограничениях запишем

$$f_1(x) = \frac{2 \sum_{n=1}^2 \int_0^t i_n^2(t) \cdot R_n(T_n, B_n) dt}{(m_2 + P) \cdot V^2 + 2 \sum_{n=1}^2 \int_0^t i_n^2(t) \cdot R_n(T_n, B_n) dt} \rightarrow \min_{x \in \mathfrak{R}^m}$$

$$f_2(x) = 1 - \frac{1}{C \cdot U_0^2 (m_2 + P)} \left( \int_0^t f_z(t, z) dt \right)^2 = f_{2\min}^* ;$$

$$f_3(x) = 1 - \frac{m_2^2 V^2}{C \cdot U_0^2 [m_2 + 0,25 \cdot \pi \cdot H_1 \cdot \gamma_1 \cdot (D_{ex1}^2 - D_{in1}^2)]} = f_{3\min}^* ;$$

$$\theta_1 = \theta_{1\min}^* ; \quad \theta_2 = \theta_{2\min}^* ; \quad \mathfrak{R}^m \in \{a_i, b_i\}, i = 1, \dots, m,$$

где  $x = (H_1, H_2, D_{in1}, D_{in2}, k_{w1}, k_{w2}, U_0)$  - вектор переменных проектирования;  $H_n$  - высота  $n$ -ой обмотки;  $D_{exn}, D_{inn}$  - внешний и внутренний диаметр  $n$ -ой обмотки;  $k_{w1}$  - количество слоев  $n$ -ой обмотки;  $a_i$  и  $b_i$  - границы области поискового пространства  $\mathfrak{R}^m$ .

При решении задачи синтеза используется иерархический подход, что позволяет обрабатывать критерии с определенными физическими значениями и контролировать процесс оптимизации. В иерархической последовательности установлен приоритет критериев, понижающийся с увеличением индекса

$$U_1(x) = \sum_{i=1}^6 (\max\{0; a_i - x_i\} + \max\{0; x_i - b_i\}) ; \quad U_2(x) = |f_2(x) - f_{2\min}^*| ;$$

$$U_3(x) = |f_3(x) - f_{3\min}^*| ;$$

$$U_4(x) = \min\{\theta_1(x) - \theta_{1\min}^*\} ; \quad U_5(x) = \min\{\theta_2(x) - \theta_{2\min}^*\} ;$$

$$U_6(x) = f_1(x) .$$

Решение  $x = x^*$  считается оптимальным, если выполняются следующие равенства:

$$U_1(x^*) = U_2(x^*) = U_3(x^*) = U_4(x^*) = U_5(x^*) = 0 ; \quad U_6(x^*) = \min f_1 .$$

Для расчетов используются функциональные зависимости, описывающие электромагнитные, механические и тепловые процессы с учетом нелинейных параметров [8]:

$$i_n = f(U_0, C, R_n, L_n, M_{12}, V, t) ;$$

$$\Delta Z = f(i_n, M_{12}, P, m_2, K_T, \beta_a, \gamma_a, t) ;$$

$$R_n = f(T_n, B_n, \delta^*) ;$$

$$T_n = f(j_n, \rho_n, c_n, \gamma_n, \lambda_n, k_{\dot{K}} \alpha_{Tn}, t) ,$$

где  $L_n$  - индуктивность  $n$ -ой обмотки;  $K_T$  - коэффициент динамического трения;  $\beta_a$  - коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\gamma_a$  - плотность среды перемещения;  $\delta^*$  - эффективная величина скин-слоя;  $j_n, c_n, \lambda_n, \rho_n, \alpha_{Tn}$  - соответственно, плотность тока, усредненная удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, удельное сопротивление, коэффициент теплоотдачи  $n$ -ой обмотки.

В табл.1 в зависимости от объема проводникового материала  $VOL$  представлены полученные параметры высокоэффективных криогенных ЛЭПД. Помимо указанных выше параметров в табл.1 показаны  $d_0$  - диаметр медного проводника;  $i_{m1}$  - максимальный ток индуктора;  $FI$  - импульс ЭДВ;  $w$  - удельная энергия преобразователя; относительная высота  $n$ -ой обмотки  $\varepsilon_{Hn} = H_n / (D_{exn} - D_{inn})$ .

Отметим, что полученные параметры эффективности преобразователей существенно превышают аналогичные параметры известных устройств.

Помимо выбора электромагнитных и геометрических параметров широкие возможности открывает подход по выбору конфигурации индуктора и якоря. Так на рис.3,а показан ЛЭПД с якорем комбинированной формы, а на рис.3,б - изменение его относительной эффективности в зависимости от параметров формы якоря  $\alpha_1 = c/e$ ;  $\alpha_2 = c/d$ .

Таблица 1

Параметры высокоэффективных ЛЭПИД

Параметр	Значения			
$VOL \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3$	0,125	0,25	0,5	1,5
$C, \text{ мкФ}$	140	260	190	150
$D_{ex1}, \text{ м}$	98	154	232	266
$D_{ex}, \text{ о.е.}$	1,15	1,20	1,10	0,98
$\varepsilon_{H1}, \%$	19,8	10,9	4,4	13,8
$\varepsilon_{H2}, \%$	3,5	1,6	2,5	1,8
$d_0, \text{ мм}$	3,0	3,4	2,8	3,8
$i_{m1}, \text{ кА}$	11,74	7,77	6,03	1,80
$f_{zm}, \text{ кГц}$	428,2	385,0	640,0	186,2
$FI, \text{ Н}\cdot\text{с}$	56,5	83,0	158,1	115,9
$V, \text{ м/с}$	40,5	45,9	34,5	31,2
$\eta_p, \%$	84	84	89	89
$\eta_{\dot{z}}, \%$	23	38	55	36
$w, \text{ Дж/кг}$	688,0	476,1	327,5	75,7

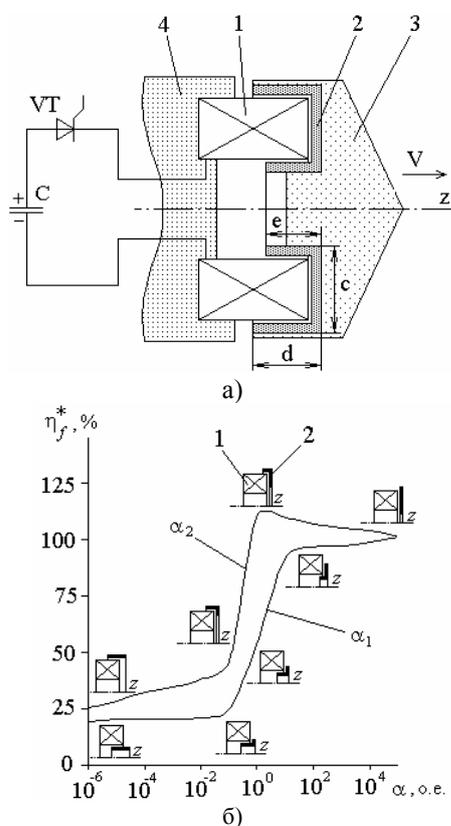


Рис.3. Структурная схема (а) и эффективность (б) ЛЭПИД с комбинированным якорем:  
1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – ИЭ; 4 – упор

На рис.3,а в качестве базовой принята дисковая конфигурация якоря. Как следует из полученных зависимостей, отсутствие дискового участка якоря существенно снижает эффективность преобразователя. Однако дисковая конфигурация якоря, обеспечивая более высокую эффективность ЛЭПИД по сравнению с цилиндрической формой, оказывается не лучшей. Наибольшую эффективность проявляет преобразователь, у которого, помимо дискового участка якоря, имеется наружный аксиальный участок, длина которого составляет примерно 0,4 от длины радиального участка.

Широкие возможности открывают конструктивные усовершенствования ЛЭПИД. В качестве наиболее эффективных технических решений можно отметить преобразователи, использующие:

- подвижный индуктор;
- квазистационарный якорь;
- форсирующую обмотку статора;
- ферромагнитный сердечник;
- наружный электромагнитный экран.

#### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПОДВИЖНЫМ ИНДУКТОРОМ

Преобразователь с подвижным индуктором содержит дополнительный вторичную обмотку статора, которая установлена коаксиально с индуктором и взаимодействует с неподвижным упором. При возбуждении подвижного индуктора, установленного между якорем и дополнительной обмоткой, возникают электродинамические силы, вследствие чего происходит ускорение индуктора, сообщаящего дополнительное ускорение якорю с ИЭ. На рис.4 показана электрическая схема замещения этого преобразователя, где указаны взаимосвязи между подвижным индуктором (индекс 1), якорем (индекс 2) и дополнительной статорной обмоткой (индекс 3). Здесь обозначены:  $V_{13}$  – скорость индуктора относительно дополнительной обмотки;  $V_{12}$  – скорость якоря относительно индуктора;  $a, b$  – подвижные токовые контакты индуктора.

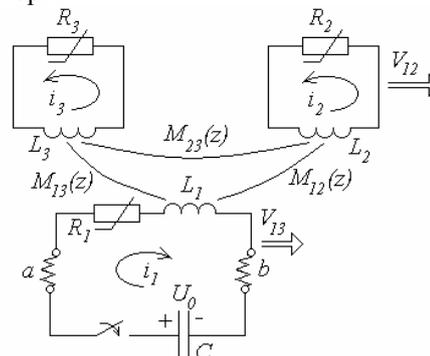


Рис.4. Схема замещения ЛЭПИД с подвижным индуктором

Как показывают исследования основные электромеханические показатели ЛЭПИТ с подвижным индуктором по сравнению с традиционным вариантом, содержащим неподвижный индуктор, заметно повышаются. Об этом свидетельствует рис.5, где представлено распределение параметра эффективности  $\eta_f$  преобразователя с подвижным индуктором при различном соотношении геометрических параметров ускоряемого якоря  $\varepsilon_{H2}$  и дополнительной статорной обмотки  $\varepsilon_{H3}$ . Вариант  $\varepsilon_{H3}=0$  соответствует параметрам преобразователя традиционной конструкции.

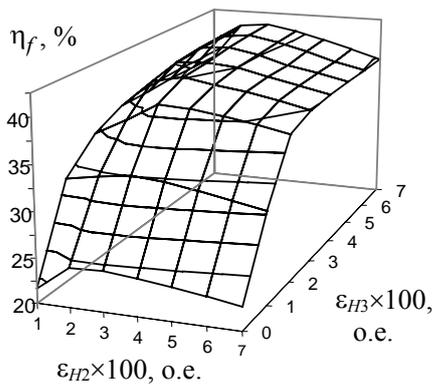


Рис.5. Распределение параметра эффективности преобразователя с подвижным индуктором в зависимости от геометрических параметров якоря и статорной обмотки

Для рассматриваемого преобразователя целесообразно выбирать вторичные обмотки с параметрами  $\varepsilon_{H2,3}=0,02...0,03$ . Заметим, что идея рассмотренного преобразователя близка к концепции многодисковых электрических машин, характеризующихся высокой степенью использования активного объема за счет устранения пассивных участков, не принимающих участие в процессе электромеханического преобразования энергии.

#### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С КВАЗИСТАЦИОНАРНЫМ ЯКОРЕМ

Концепция преобразователя с квазистационарным якорем состоит в следующем. ЭДУ  $f_z(t,z)$ , действующие на якорь, зависят как от взаимодействия токов в индукторе  $i_1(t)$  и якоря  $i_2(t)$ , так и от градиента взаимной индуктивности  $dM/dz(z)$  между ними. При этом необходимо учесть, что все эти параметры во времени и в пространстве имеют ярко выраженный импульсный характер. Исходя из этого, для повышения эффективности ЛЭПИД необходимо обеспечить оптимальное взаимодействие между этими пространственно-временными параметрами. Иными словами, максимум токов индуктора  $i_1(t)$  и якоря  $i_2(t)$  должен возникать в то время, когда якорь находится на определенном расстоянии относительно индуктора, где градиент взаимной индуктивности  $dM/dz(z)$  имеет максимальное значение. Для обеспечения указанного условия предлагается конструкция якоря, у которого при его ускорении токовая зона остается неподвижной на начальном этапе работы. Токовая зона реализуется путем размещения в разрезах якоря неподвижных контактных элементов. На рис.6 показана принципиальная схема преобразователя с квазистационарным якорем и распределение градиента взаимной индуктивности между индуктором и токовой зоной якоря. На этом рисунке обозначены: 1 - индуктор; 2 - якорь высотой  $H_2$ ; 3 - разрезы в якоря; 4 - неподвижные контактные элементы; 5 - диэлектрический бандаж;  $I$  - центральная плоскость индуктора;  $II$  - центральная плоскость токовой зоны якоря;  $H_2^*$  - длина токовой зоны якоря.

Данная концепция преобразователя с квазистационарным якорем, реализующая улучшенные про-

странственно-временные характеристики, несмотря на определенное усложнение конструкции по сравнению с традиционным вариантом ЛЭПИД с массивным якорем, обеспечивает надежное перемещение якоря относительно индуктора при малом зазоре между ними и позволяет существенно повысить скоростные, силовые и энергетические показатели. Как показывают исследования, за счет применения квазистационарного якоря удается повысить механические показатели преобразователя на 40...80 %, а параметр эффективности  $\eta_f$  - в 1,5...2,4 раза.

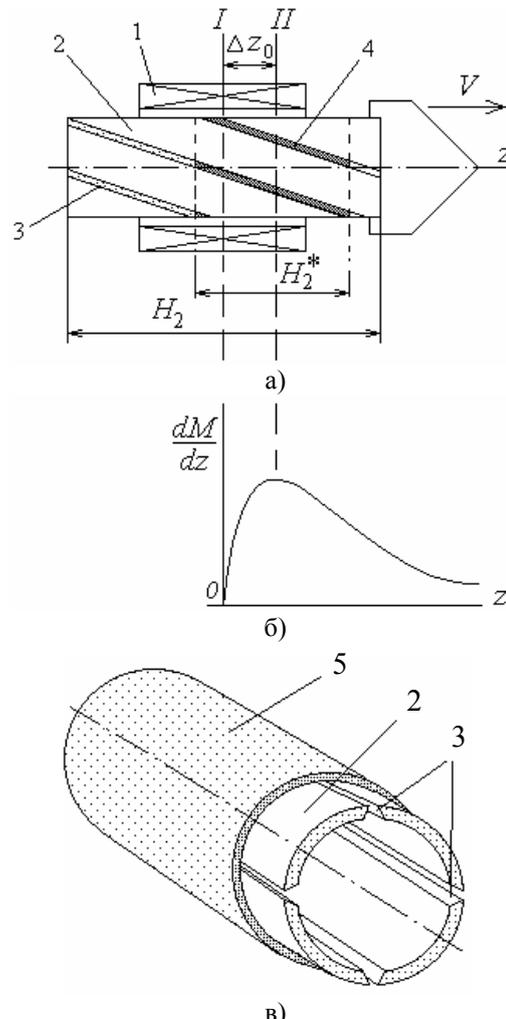


Рис.6. Принципиальная схема ЭИПИТ с квазистационарным якорем (а), распределение градиента взаимной индуктивности (б) и конструкция якоря (в)

#### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФОРСИРУЮЩЕЙ ОБМОТКОЙ

Введение в магнитную цепь преобразователя неподвижной форсирующей обмотки (ФО) позволяет существенно влиять на его эффективность [9]. Так, на рис.7 показано влияние расположения ФО относительно индуктора на относительную эффективность  $\eta_f^*$  коаксиального ЛЭПИД (в качестве базового используется преобразователь без ФО), где обозначены: 1 - индуктор; 2 - ускоряемый якорь; 3 - ФО; 4 - ИЭ.

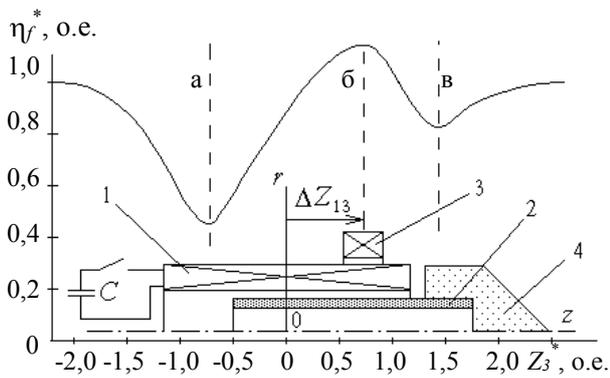


Рис.7. Схема и относительная эффективность коаксиального ЛЭПД

Как показывают расчеты, наименьшее ускорение якоря с ИЭ обеспечивается при осевом смещении ФО  $Z_3^* = 2 \cdot \Delta Z_{13} / (H_1 + H_3) = -0,33$  (положение *a* на рис.7). При этом амплитуда токов в индукторе и якоре повышается, соответственно на 27% и 15%, а длительность периода колебаний уменьшается почти на треть. Воздействие ФО можно объяснить тем, что полярность токи в этой обмотке и якоре имеют одинаковую полярность при незначительном фазовом сдвиге, а ФО расположена против направления движения якоря, то между ними возникает сила, тормозящая якорь.

Если ФО сместить вперед по ходу движения якоря на величину  $Z_3^* = 0,66$  (положение *б* на рис.7), то эффективность преобразователя повышается на 8,5% по сравнению с базовым вариантом. При этом величина первого пика аксиальной силы  $f_z(t)$  увеличивается на 7%, а второго пика - на 13%. Такое воздействие ФО можно объяснить тем, что полярность токов обмоток в начале переходного процесса одинакова, т.е. между ними действует сила притяжения  $f_{z23}$ . Но так как ФО смещена относительно центральной плоскости якоря в сторону движения, то обеспечивается дополнительное его ускорение.

Если ФО переместить вперед на расстояние  $Z_3^* = 1,29$  (положение *в* на рис.7), где проявляется локальный минимум эффективности ЛЭПД, то здесь происходит изменение полярности тока ФО на противоположное. Данный факт можно объяснить тем, что здесь образуется более сильная магнитная связь ФО с якром, чем с индуктором, а значит и индукционное воздействие якоря является превалирующим. Но так как токи обмоток находятся в противофазе, т.е. между ними действует сила отталкивания, а ФО находится впереди по ходу движения якоря, то она создает тормозную силу  $f_{z23}$ . Дальнейшее перемещение ФО вдоль оси *z* снижает магнитное взаимодействие ее с остальными обмотками, что приводит к ослаблению тормозного воздействия. Таким образом, за счет расположения ФО относительно индуктора можно обеспечить дополнительное ускорение, либо торможение якоря.

#### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Ферромагнитный сердечник вызывает изменение скоростных, силовых и энергетических показателей

ЛЭПД за счет перераспределения магнитного поля в активной зоне. На рис.8 схематично показан коаксиальный преобразователь с сердечником и распределение векторов индукции магнитного поля ( $B_m = 4,23$  Т) в момент максимума тока индуктора. Так, амплитуда тока возбуждения снижается на 16 %, а его длительность повышается на такую же величину по сравнению с аналогичной немагнитной конструкцией, в результате чего амплитуда ЭДУ возрастает на 25 %, а скорость - на 35 %. При этом нагрев индуктора несколько снижается, а якоря - повышается.

Введение сердечника в магнитную систему позволяют повысить ряд электромеханических показателей "теплого" ЛЭПД, хотя их влияние не столь значительно из-за насыщения; при этом все удельные показатели преобразователя ухудшаются. При использовании криогенного охлаждения влияние сердечника будет еще менее существенным из-за возрастания токов в обмотках и общего уровня магнитных полей в активной зоне устройства. Если же учесть затраты хладагента на охлаждение ферромагнетика, усложнение конструкции криостата, увеличение веса и др., можно сделать вывод о нецелесообразности применения сердечников в магнитной системе легких и высокоэффективных криогенных преобразователей.

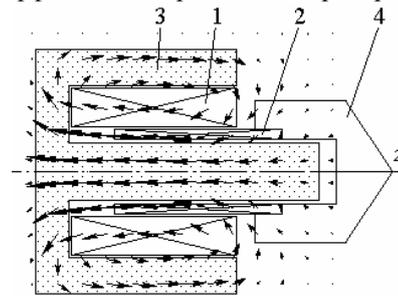


Рис.8. Распределение векторов индукции ЛЭПД: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – сердечник; 4 - ИЭ

#### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С НАРУЖНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЭКРАНОМ

Традиционные ЛЭПД не содержат специальных устройств снижения внешних магнитных полей, вследствие чего возникает проблема электромагнитной совместимости. Оценим влияние наружного электромагнитного экрана (НЭЭ) с учетом, как внешнего магнитного поля, так и основных рабочих показателей криогенного преобразователя коаксиальной конфигурации. В общем случае НЭЭ может содержать заднюю *3a* и переднюю *3b* дисковые части и соединяющую их центральную цилиндрическую часть *3* (рис.9). Исходя из размеров криостата, расположим заднюю дисковую часть экрана *3a* на расстоянии  $\Delta z_1 = 0,25H_1$ , а его внешний диаметр выполним, равным  $D_{ex3} = 1,25D_{ex1}$ .

НЭЭ существенно перераспределяет магнитное поле как в активной зоне ЛЭПД, так и в окружающем пространстве. Помимо перераспределения магнитного поля, экран изменяет характеристики преобразователя (рис.10).

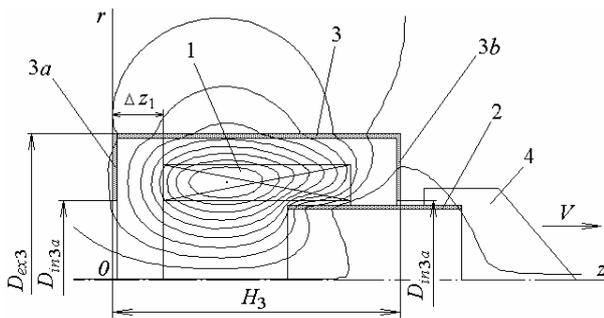


Рис.9. Распределение силовых линий магнитного поля при максимуме силы  $f_z$  в ЛЭПИД:  
1 – индуктор; 2 – яркорь; 3 – НЭЭ; 4 – ИЭ

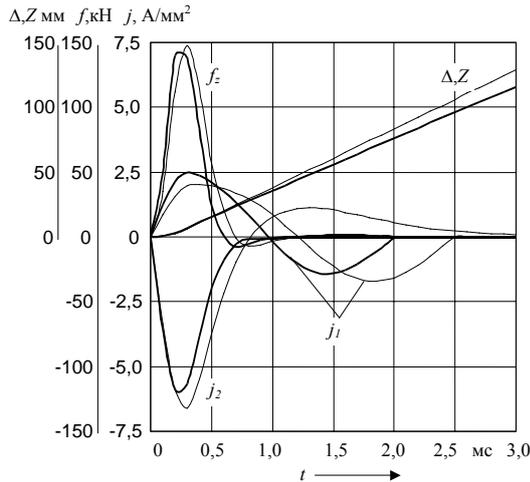


Рис.10. Электромеханические характеристики незранированного (тонкие линии) и экранированного (жирные линии) ЛЭПИД

За счет появления НЭЭ происходит укорочение рабочего импульса тока возбуждения (представленного в виде плотности тока в индукторе  $j_1$ ) с одновременным увеличением его амплитуды в первом полупериоде и уменьшением - во втором. Величина усредненной плотности тока в яркоре  $j_2$  снижается, и ток затухает сильнее. Аналогичный характер оказывает экран на электродинамическую силу  $f_z$ , вызывая понижение основных механических показателей: скорости  $V$  и перемещения  $\Delta Z$  яркора с ИЭ. В результате изменения токов за счет наличия НЭЭ уменьшается величина усредненного превышения температуры в индукторе  $\theta_1$  и яркоре  $\theta_2$ , особенно сильно в последнем. При этом наблюдается существенный прирост температуры экрана  $\theta_3$ , находящегося при температуре окружающей среды.

Наружный экран приводит к уменьшению скорости яркора – до 11 %, увеличению амплитуды тока возбуждения – до 22 %, понижению превышений температуры индуктора – до 19 % и яркора – до 41 %. При этом магнитное поле в ближней зоне (на расстоянии  $r = 2D_{ex1}$ ) понижается – до 60 %, а в дальней зоне (на расстоянии  $r = 2D_{ex1}$ ) – до 64 %.

Для оценки эффективности ЭИПИТ введем комплексный критерий, который учитывает как его рабочие показатели, так и возбуждаемое при этом магнитное поле в окружающем пространстве

$$K_e^* = \eta_f^* / B_{cp}^*$$

где  $B_{cp}$  – усредненное магнитное поле в окружающем пространстве:

$$-0,75H_1 \leq z \leq 2,25H_1; 2D_{ex1} \leq r \leq 4D_{ex1}$$

в момент максимума электродинамического воздействия на ускоряемый яркорь.

Наибольшую эффективность ( $K_e^* \approx 2,1$ ) проявляет преобразователь с конфигурацией НЭЭ, представленной на рис.9. Заметим, что у незранированного ЛЭПИТ данный показатель составляет  $K_e^* = 1,0$ . Таким образом, за счет оптимальной конфигурации НЭЭ более, чем в 2 раза повышается комплексный критерий эффективности преобразователя.

### МНОГОСЕКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Широкие возможности по повышению эффективности открывает преобразователь с многосекционным индуктором, у которого последовательное возбуждение секций осуществляется по мере перемещения яркора с ИЭ [10]. На рис.11,а представлен трехсекционный ЛЭПИД, индуктор и яркорь которого имеют независимое охлаждение. Секции 1, 2, 3 индуктора расположены в немагнитном криостате 4 с жидким азотом 5 и закреплены между собой при помощи перфорированных опорных элементов 6. Яркорь 7 соединен с ИЭ 8 и охлаждается азотом, находящимся в специальной опорной перфорированной полости 9. Секции индуктора по направлению движения установлены с зазорами, величины которых  $h_1$  и  $h_2$  выбираются в зависимости от параметров преобразователя. Начальное центрирование яркора осуществляется при помощи направляющего элемента 10, прикрепленного к массивному упору 11. До начала работы внутреннее отверстие для яркора на выходе криостата 4 закрывается теплоизоляционной вставкой 12.

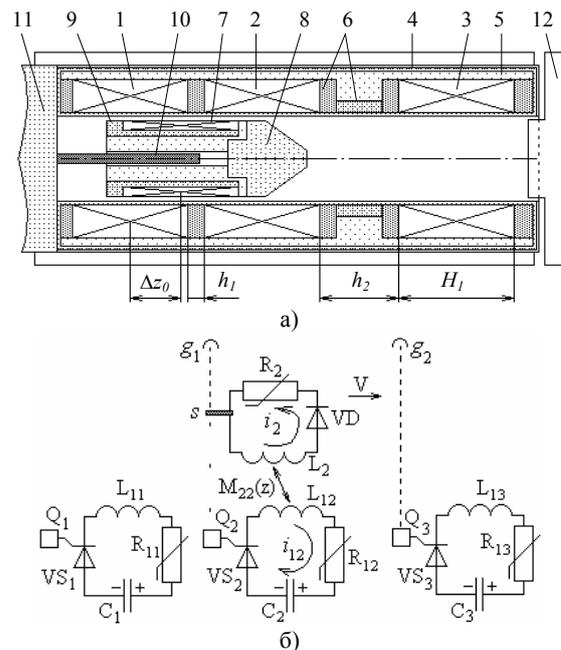


Рис.11. Конструктивная (а) и электрическая (б) схемы криогенного ЛЭПИД с последовательным возбуждением секций индуктора

На рис.11,6 показана принципиальная электрическая схема этого преобразователя, где обозначены:  $R_{1p}, L_{1p}$  - сопротивление и индуктивность  $p$ -ой секции индуктора;  $R_2, L_2$  - сопротивление и индуктивность якоря, перемещаемой со скоростью  $V$ ;  $VS_p$  - тиристор с блоком управления  $Q_p$ , обеспечивающий возбуждение секций индуктора от секции емкостного накопителя  $C_p$ ;  $VD$  - диод, обеспечивающий полярность импульса индуцированного тока в якоре.

После подачи импульса на первый блок управления  $Q_1$  тиристора  $VS_1$  за счет электродинамического взаимодействия между магнитным полем первой секции индуктора и индуцированным током в якоре осуществляется перемещение якоря вместе с ИЭ. Возбуждение последующих секций осуществляется автоматически при помощи оптоэлектронной системы, содержащей неподвижные, направленные на датчики блоков управления  $Q_{2,3}$ , источники света  $g_{1,2}$ , закрываемые светозащитной шторкой  $s$ , которая соединена с ускоряемым якорем. Коммутация каждой последующей секции осу-

ществляется после прекращения тока в предыдущей.

Как показывают расчеты, рассредоточенный и последовательный подвод энергии к секциям индуктора обеспечивает повышение его выходной скорости на 45...55 % при комнатной и на 25...30 % при азотной температурах, увеличение КПД, соответственно, более, чем в 2,2 и 1,6 раза по сравнению с сосредоточенным и одномоментным подводом энергии, что происходит в односекционном ЛЭПИД. В многосекционной обмотке индуктора динамические нагрузки рассредоточиваются, что способствует повышению ее надежности, а суммарные потери снижаются на 30...40 % по сравнению односекционным вариантом.

Таким образом, за счет совокупности конструктивных усовершенствований, криогенного охлаждения жидким азотом, синтезом оптимальных параметров и конфигураций активных элементов и применением многосекционных конструкций можно существенно повысить эффективность линейного электромеханического преобразователя импульсного действия.

#### ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ

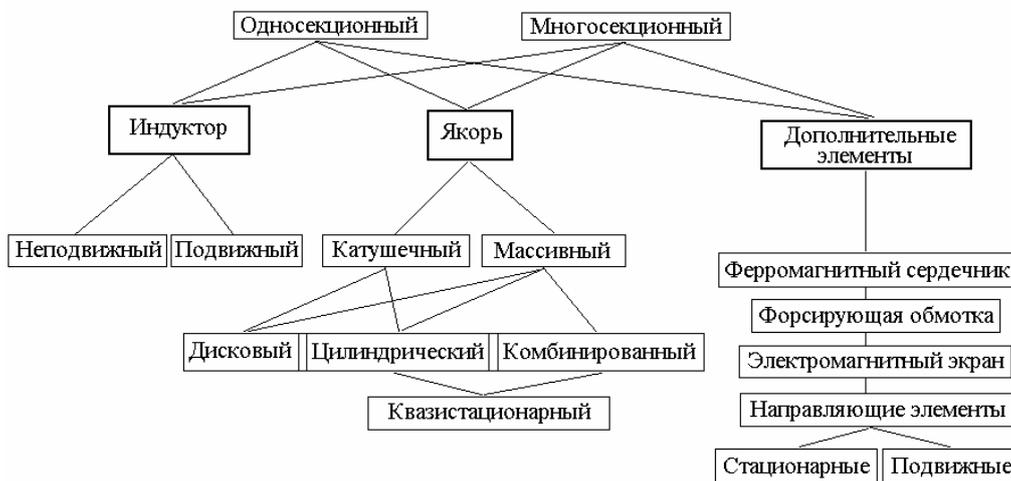


Рис.12. Классификация конструкций ЛЭПИД

На основе проведенных исследований и обобщений предлагается классификация ЛЭПИД по конструктивным признакам (рис.12).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тютюкин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. - 2002. - № 11. - С. 24-28.
- [2] A. Balıkcı, Z. Zabar, L. Birenbaum et al., "Improved performance of linear induction launchers", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 41, № 1, pp. 171-175, 2005.
- [3] Mayer D., Ulrych V., Skopek M. et al., Dynamic characteristics of non-ferromagnetic pulse electromechanical accelerator // Техн. электродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. - 2000. - Ч. 9. - С. 18-23.
- [4] B.M. Novac, P. Senior, I.R. Smith et al., "Studies of a very high efficiency cryogenic launcher", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, № 1, pp. 123-128, 2001.
- [5] Болюх В.Ф. Эффективность электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа. Критерии и анализ // Электротехніка і електромеханіка. - 2004. - № 3. - С. 13-18.
- [6] L.I. Lysenko, V.I. Omelyanenko, S.A. Sergeev, "Parallel genetic algorithm and its application to linear synchronous motor optimization", *Inter. Journal Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 9, № 3, pp. 303-314, 1998.
- [7] Голоскоков Е.Г., Северин В.П. Модификация метода деформируемого многогранника для оптимизации иерархической последовательности критериев // Техн. кибернетика и ее приложения. - Харьков: Выща школа. - 1986. - С. 27-30.
- [8] Болюх В.Ф. Переходные процессы в электромагнитной системе возбуждения с криорезистивными нелинейностями и магнитными связями // Известия РАН. Энергетика. - 2001. - № 5. - С. 103-113.
- [9] Болюх В.Ф. Влияние короткозамкнутой катушки на работу линейного импульсно-индукционного криогенного двигателя // Изв. вузов. Электромеханика. - 2000. - № 2. - С. 45-53.
- [10] S. Barmada, A. Musolino, M. Raugi et al., "Analysis of performance of a multi-stage pulsed linear induction launcher", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, № 1, pp. 111-115, 2001.

Поступила 25.02.2006

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАШИННО-ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ ПОЛНОСТЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Галиновский А.М., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Киевский политехнический институт"  
Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37, НТУУ "КПИ", кафедра "Электромеханика"  
тел. (044) 412-47-66

Ленская Е.А., научный сотрудник

Научно-производственное общество "ТЭМП", Киев

Эрхард Айхофер, дипломированный инженер "Transresch Antriebssysteme" GmbH, г.Берлин.

*Досліджена модель трифазно-трифазного електромашинно-вентильного перетворювача частоти, побудованого на базі трьох діодних мостових випрямлячів, які закорочені трьома повністю керованими ключами, при зміні параметрів захисних віток вентилів, показано, що такий перетворювач не може бути застосованим в системі збудження безконтактної асинхронізованої машини в зв'язку з великими комутаційними перенапругами та втратами в перетворювачі.*

*Исследована модель трехфазно-трехфазного электромашинно-вентильного преобразователя частоты, построенного на базе трех диодных мостовых выпрямителей, которые закорочены тремя полностью управляемыми ключами, при изменении параметров защитных цепей вентилей, показано, что такой преобразователь не может быть применен в системе возбуждения бесконтактной асинхронизированной машины в связи с большими коммутационными перенапряжениями и потерями в преобразователе.*

В настоящее время проблема энергосбережения приобрела особую актуальность в связи со значительным ростом цен на энергоносители. Важнейшими проблемами энергетики являются разработка и совершенствование генераторов постоянной частоты при переменной частоте вращения вала (ветроэнергетика, дизель - и газогенераторные установки) и регулируемого электропривода (насосы, вентиляторы, компрессоры и др.).

Несмотря на большую потребность в регулируемом электроприводе его внедрение на Украине проводится крайне низкими темпами. Это связано с тем, что в основном регулируемый электропривод сочетает преобразователь частоты в питающей сети и асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Подобные агрегаты дорогие, так как стоимость преобразователей в несколько раз выше стоимости двигателя. Особо дорогие агрегаты с высоковольтными двигателями.

В связи с вышесказанным перспективным является применение асинхронизированных машин (АСМ) с преобразователями в роторной цепи [4, 6, 7, 9, 10]. При ограничении диапазона регулирования скорости вращения необходимая мощность преобразователя существенно снижается, что снижает стоимость агрегата в целом.

Требования по повышению надежности электрических машин исключают или ограничивают применение щеточно-контактных узлов. Актуальным вопросом является разработка и широкое внедрение бесконтактных АСМ (БАСМ).

В БАСМ применяется электромашинно-вентильный преобразователь (ЭМВП). ЭМВП состоит из электромашинного возбудителя переменного

тока и вращающегося преобразователя частоты. ЭМВП вместе с устройствами управления, диагностики и защиты образует бесконтактную систему возбуждения (БСВ) синхронной машины.

Разработка БСВ АСМ проводится на базе синхронных и асинхронных возбудителей и вращающихся преобразователей частоты с непосредственной связью (НПЧ), в которых однократное преобразование энергии обуславливает высокое значение КПД, малые габариты и массу [3 ÷ 7]. Перспектива широкого внедрения БАСМ во многом определяется возможностью построения простых и надежных систем управления вращающимся преобразователем.

Статические НПЧ в АСМ с контактными кольцами ранее не нашли широкого применения, так как имели недостатки:

- сравнительно малая частота выходного напряжения (примерно 30 % от частоты сети);
- низкое качество формы выходного напряжения;
- сложность формирования кривой выходного напряжения.

Эти недостатки могут быть устранены в ЭМВП БАСМ.

Значение выходной частоты вращающегося преобразователя БАСМ ограничивается диапазоном скольжения. При этом частота на входе преобразователя (частота якорной обмотки возбудителя) больше частоты сети в 3 ÷ 8 раз в связи с повышенным числом пар полюсов возбудителя [9].

В ЭМВП может быть получено самое высокое качество формы выходного напряжения при применении каскадных возбудителей с модулированным напряжением [9].

Формирование кривой выходного напряжения

ЭМВП существенно упрощается при применении циклического алгоритма управления [4, 5, 7]. Его сущность заключается в том, что фазы источника периодически через равные интервалы времени в определенной последовательности подключаются к нагрузке. Частота управления  $\omega_u$  может быть выше или ниже частоты источника  $\omega_i$ . При этом частота выходного напряжения НПЧ (частота нагрузки) определяется разностью указанных частот:  $\omega_n = \omega_i - \omega_u$ . Амплитуда выходного напряжения ЭМВП регулируется изменением тока возбуждения возбудителя.

Наиболее просто циклический алгоритм управления реализуется в НПЧ с искусственной коммутацией (НПЧИ) при ограниченном числе полностью управляемых ключей. Простота системы управления и преобразователя в целом – достоинство НПЧИ.

В работе [4] приводится анализ работы статического трехфазно-трехфазного НПЧИ с тремя полностью управляемыми ключами при частоте управления большей и меньшей частоты источника. По мнению авторов очень важным является то, что при  $f_u > f_i$  знаки реактивной мощности на входе и выходе НПЧИ получаются противоположными, благодаря чему при отстающем коэффициенте мощности нагрузки можно получить опережающий коэффициент мощности на стороне питающей сети. Поэтому в НПЧИ наиболее целесообразно применять алгоритм управления, при котором  $f_u > f_i$ .

В работе [7] рассматривается возможность применения такого НПЧИ в БСВ асинхронизированного турбогенератора. БСВ построена на базе синхронного возбудителя и трехфазно-трехфазного НПЧИ.

Несмотря на сравнительно большое внимание, уделяемое в литературе НПЧИ с ограниченным числом полностью управляемых ключей, они практически не нашли применения в системах возбуждения АСМ. Об этом, в частности, свидетельствует хотя бы тот факт, что в технической литературе имеется много сведений о разработке таких преобразователей, но в то же время отсутствуют сведения об их внедрении. В литературе практически отсутствуют сведения по коммутационным перенапряжениям и потерям преобразователя. Вместе с тем отсутствие внедрений "самых простых" ЭМВП в системах возбуждения БАСМ косвенно влияет на объем исследовательских работ по разработке других "более сложных" ЭМВП, влияет на темпы внедрения БАСМ в энергосберегающую технологию. Поэтому актуальным является всестороннее исследование работы ЭМВП на базе НПЧИ с ограниченным числом полностью управляемых ключей.

При исследовании ЭМВП в целом или их отдельных блоков целесообразно применение математических систем схемотехнического моделирования, в которых имеется библиотека компонентов, включая аналоговые компоненты вентилялей. Сопоставления результатов исследований преобразователей в разных математических системах и физических макетов преобразователей позволяют определить правомерность исходных допущений, обосновать выбор сравнительно простых схем преобразователей, адаптированных к исследованию более сложных электромашино-

вентильных и энергетических систем.

Исследование работы модели ЭМВП БАСМ на базе трехфазно-трехфазного НПЧИ с тремя полностью управляемыми ключами, анализ величин коммутационных перенапряжений и потерь в преобразователе – основные задачи настоящей работы. Исследования проведены в системе схемотехнического моделирования Micro-Cap [8].

Рассмотрим вначале формирование кривых выходного напряжения в НПЧИ [4, 7].

В трехфазно-однофазном НПЧИ кривые синусоидального напряжения трехфазного источника питания преобразуются в кривую однофазного выходного напряжения. Переключение полностью управляемых полупроводниковых ключей НПЧИ осуществляют по исходной переключающей функции частоты управления  $\omega_u$  [5]. Длительность сигналов управления  $su$  ( $su_1, su_2, su_3$ ), определяющих включенное состояние ключей, составляет  $120^\circ$  (рис. 1,а). Изменение фазы сигналов управления ключами на угол  $\varphi$  по частоте  $\omega_u$  приводит к изменению фазы выходного напряжения НПЧИ на угол  $\varphi$  по частоте  $\omega_n$ . Трехфазно-трехфазный нулевой НПЧИ строится на базе трех трехфазно-однофазных нулевых НПЧИ (рис. 1,б). Три фазные НПЧИ подключены к трем одинаковым трехфазным группам вторичных обмоток источника питания. Смещение фазы напряжения нагрузки на угол  $120^\circ$  осуществляется при смещении фазы сигналов управления ключами одноименных фаз трех фазных НПЧИ по круговому циклу. При таком алгоритме управления схему НПЧИ с нулевыми вентильными группами можно реализовать с ограниченным числом полностью управляемых ключей.

Поменяем местами ключ и обмотку в каждой фазе источника, как показано на рис. 1,с. Выполним комбинированное потенциальное разделение фаз источника таким образом, чтобы в группу с общим нулем входили фазы с ключами, управляемыми одним сигналом управления (рис. 1,д,е). Схема модели НПЧИ (рис. 1,е) в системе схемотехнического моделирования Micro - Cap 1] показана на рис. 2. Модель построена на базе трех четырехобмоточных трансформаторов.

В примере расчета примем следующие значения параметров источника питания: фазная ЭДС  $E_i = 127$  В; частота  $f_i = 100$  Гц. Параметры сигналов управления определяются по исходной переключающей функции частоты управления [6],  $f_u = 120$  Гц. На рис. 3 приведены диаграммы напряжений (а, б, в) и токов (д) нагрузки НПЧИ.

В схеме по рис. 1,е три ключа НПЧИ, управляемые сигналами управления с одинаковыми параметрами, могут быть заменены одним диодным мостом, который закорочен одним ключом (рис. 1,ф). Получаем схему НПЧИ с ограниченным числом полностью управляемых ключей. Силовая часть схемы содержит три трехфазных диодных моста, присоединенных к концам трех трехфазных обмоток источника питания. Начала обмоток присоединены к нагрузке. К выводам постоянного тока диодных мостов присоединены

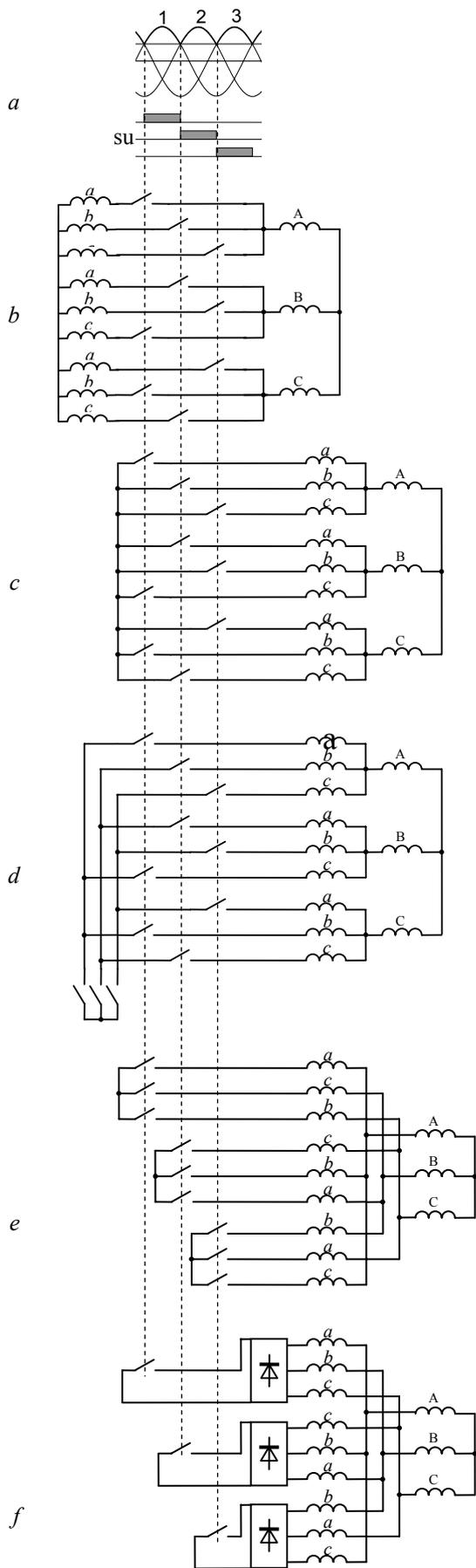


Рис. 1

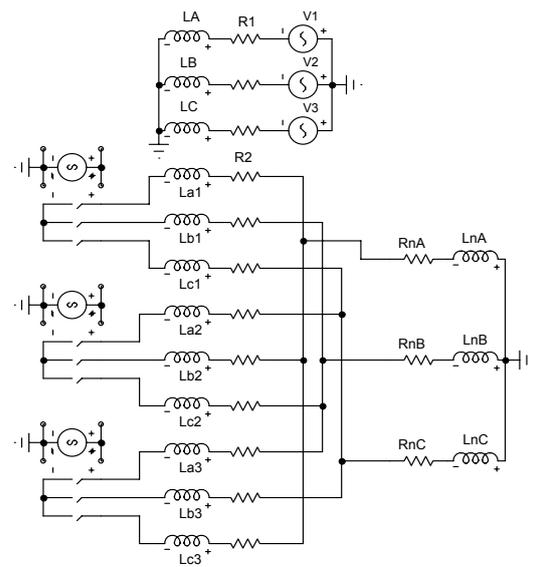


Рис. 2

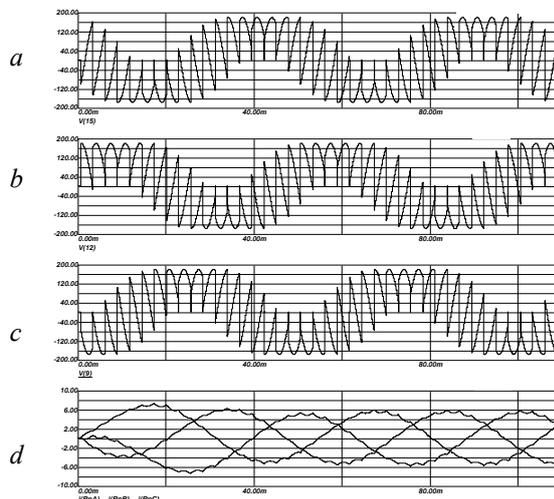


Рис. 3

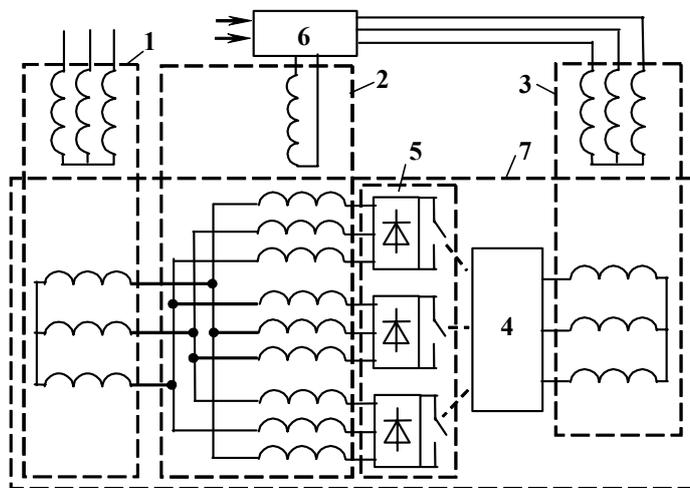


Рис. 4

полностью управляемые ключи К1, К2, К3, управляемые в соответствии с диаграммой рис. 1,а.

На рис. 4 приведена принципиальная схема бесконтактного асинхронизированного генератора (БАСГ) с вращающимся НПЧИ. На схеме: 1 – асинхронная машина с фазным ротором; 2 – синхронный возбудитель (СВ); 3 – управляющая машина (УМ); 4 – блок сигналов управления; 5 – преобразователь частоты; 6 – автоматический регулятор возбуждения (АРВ); 7 – вращающаяся часть. На роторе СВ расположены три группы трехфазных обмоток, соединенных по схеме "звезда". Группы обмоток нулевыми точками подключены к трехфазной обмотке возбуждения генератора, а другими концами – к входу преобразователя частоты. Преобразователь состоит из трех трехфазных мостовых выпрямителей, закороченных накоротко тремя полностью управляемыми ключами.

Синхронный возбудитель, управляющая машина и генератор [9] имеют одинаковое количество полюсов. На статор УМ подается напряжение частоты скольжения. Частота нагрузки преобразователя

$$\pm f_n = f_i - f_u, \quad (1)$$

где  $f_i$  – частота ЭДС обмотки якоря СВ. Амплитуда тока возбуждения генератора регулируется током возбуждения синхронного возбудителя.

Система возбуждения БАСГ может быть построена на базе многополюсного синхронного возбудителя и управляющей машины, на обмотку статора которой подается напряжение требуемой частоты генератора [9]. Для выполнения условия (1) необходимо согласование чисел пар полюсов генератора  $p$ , синхронного возбудителя  $p_B$  и управляющей машины  $p_u$ .

Скорость вращения поля статора генератора

$$n_1 = f / p, \quad (2)$$

частота ЭДС якоря генератора

$$f_n = f_s = f \cdot s, \quad (3)$$

скорость вращения вала

$$n = n_1 \cdot (1-s) = f \cdot (1-s) / p, \quad (4)$$

где:  $f$  – частота сети;  $s$  – скольжение генератора.

Частота ЭДС обмотки якоря возбудителя

$$f_i = p_B \cdot n = p_B \cdot f(1-s) / p, \quad (5)$$

При возбуждении УМ переменным током частоты  $f$  в обмотке якоря наводится ЭДС с частотой

$$f_u = p_u \cdot n \pm f = p_u \cdot f(1-s) / p \pm f. \quad (6)$$

Учитывая (1), (5) и (6), получим:

$$p_u = p_B \mp p. \quad (7)$$

Знак "+" ставится при вращении поля статора УМ против направления вращения вала, знак "-" – при согласном направлении вращения.

Схема модели ЭМВП БАСМ в системе МС приведена на рис. 5. Трехфазные диодные мосты закорочены транзисторами. Диоды шунтируются защитными  $R_f C_f$  – фильтрами. Применены также фильтры нагрузки.

Расчета моделей преобразователя проведен при следующих параметрах:  $p = 1$ ;  $p_B = 3$ ;  $p_{u1} = p_B + p = 4$ ;  $p_{u2} = p_B - p = 2$ . При частоте сети  $f = 50$  Гц и скольжении генератора  $s = 0.05$  в обмотках якорей возбудите-

ля и управляющих машин наводятся ЭДС следующих частот:

$$f_i = p_B f(1-s) / p = 3 \cdot 50 \cdot (1-0.05) / 1 = 142.5 \text{ Гц.}$$

$$f_{u1} = p_{u1} f(1-s) / p - f = 4 \cdot 50(1-0.05) / 1 - 50 = 140 \text{ Гц.}$$

$$f_{u2} = p_{u2} f(1-s) / p + f = 2 \cdot 50(1-0.05) / 1 + 50 = 145 \text{ Гц.}$$

В первом случае частота управления больше частоты источника питания,  $f_{u1} > f_i$ . Во втором случае  $f_{u2} < f_i$ .

Частота нагрузки преобразователя

$$f_n = f \cdot s = 50 \cdot 0.05 = 2.5 \text{ Гц.}$$

В схеме применены диоды типа MR2510 D. Повторяющееся напряжение  $U_n = 1000$  В. Предельный ток  $I_n = 25$  А. Время восстановления запирающих свойств диодов  $\tau = 5.7 \cdot 10^{-6}$  сек.

Тип транзисторов: IRG4PH50S.

Параметры модели возбудителя:

$L_{m1} = L_{m2} = 0.02727$  Гн – главные индуктивные сопротивления первичного и вторичного контуров;

$L_{s1} = 0$ ,  $L_{s2} = 0.002989$  Гн – индуктивные сопротивления рассеяния обмоток;

$R_1 = 0$ ,  $R_2 = 0.4137$  Ом – активные сопротивления обмоток.

Индуктивность и активное сопротивление источника питания:  $L_i = L_{s2}$ ;  $R_i = R_2$ .

Параметры нагрузки:

$R_n = 8.74$  Ом,  $L_n = 0.57$  Гн – активное сопротивление и индуктивность нагрузки;

$L_{fn} = 0.0001$  Гн,  $C_{fn} = 0.5 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_{fn} = 0.0001$  Ом – параметры фильтра нагрузки.

Примем амплитуду ЭДС нагрузки  $A_n = 0$ .

Коэффициент мощности нагрузки отстающий,  $\cos \varphi_n = 0.7$ .

Величина амплитуды ЭДС источника питания  $A_i$  выбирается из условия: максимальное напряжение на диодах должно быть меньше величины  $U_n$ .

На рис. 6 – диаграммы напряжений и токов преобразователя при отсутствии защитных фильтров диодов:  $C_f = 0$ ;  $A_i = 20$  В;  $f_{u1} = 140$  Гц. На рисунках показаны:

a – фазные токи нагрузки  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ , и вектор тока нагрузки  $V_{in}$ ;

b – фазное напряжение нагрузки  $u_A$ ;

c – напряжение на диоде Д1 (величина  $u_{D1}$ ) и транзисторе V1 ( $u_{G1}$ );

d – ток через диод Д1 ( $i_{D1}$ ) и транзистор V1 ( $i_{G1}$ ).

Все величины в физических единицах. В правой части рисунков – фрагменты диаграмм.

Анализ диаграмм показывает, что при отсутствии защитных фильтров диодов обратное напряжение на диоде достигает величины  $U_n = 1000$  В. Таким образом, обратное напряжение на диоде может быть больше амплитуды ЭДС источника примерно в 50 раз.

Это, прежде всего, связано с коммутационными свойствами диодов, для восстановления запирающих свойств которых требуется определенное время. В работах [1÷3] рассматриваются особенности работы диодов в трехфазном мостовом выпрямителе. Диод выпрямителя после уменьшения прямого тока до нуля остается открытым на интервале времени восстановления запирающих свойств  $\tau$ . На этом интервале через вентиль протекает обратный ток, после чего сопро-

тивление вентиля резко возрастает, обратный ток вентиля падает до своего установившегося значения. Из-за наличия индуктивности источника питания резкий обрыв обратного тока является причиной возникновения коммутационного перенапряжения на вентиле.

В работе [12] показано, что во вращающемся трехфазном мостовом диодном выпрямителе бесконтактной системы возбуждения синхронной машины

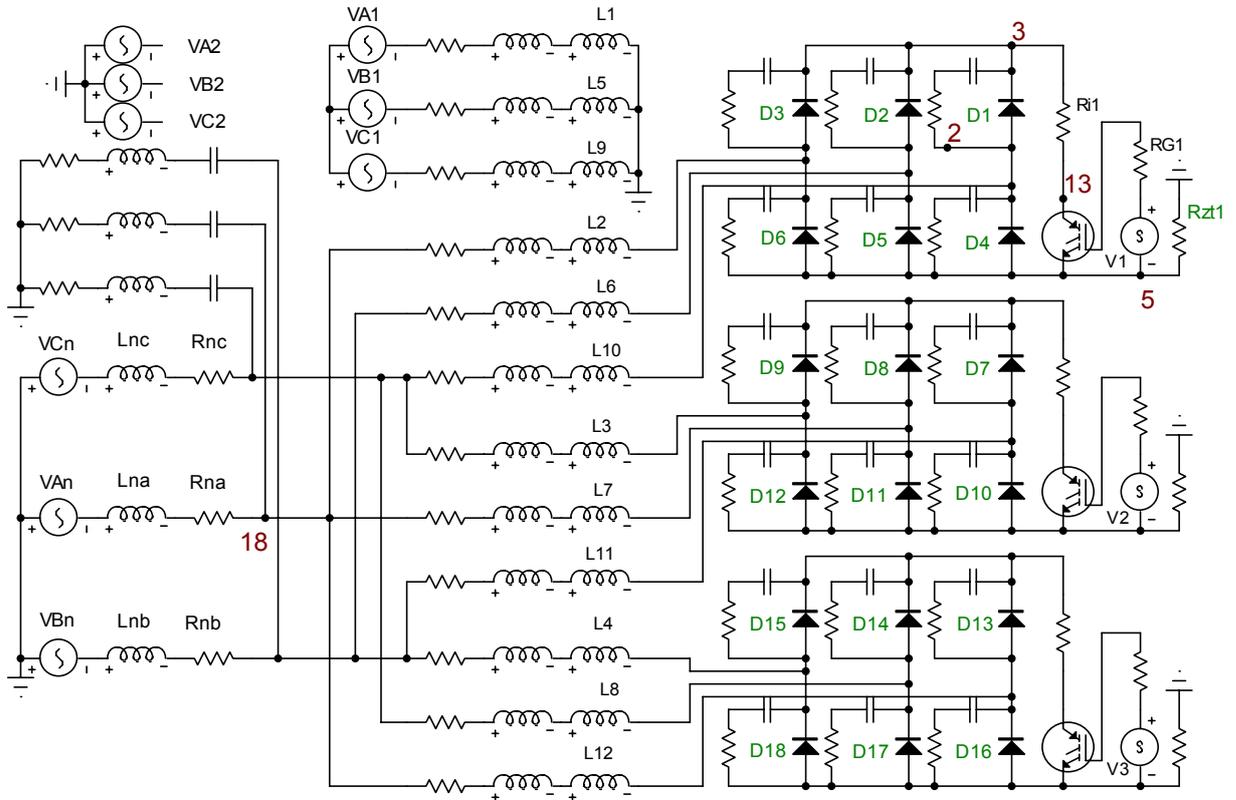


Рис. 5

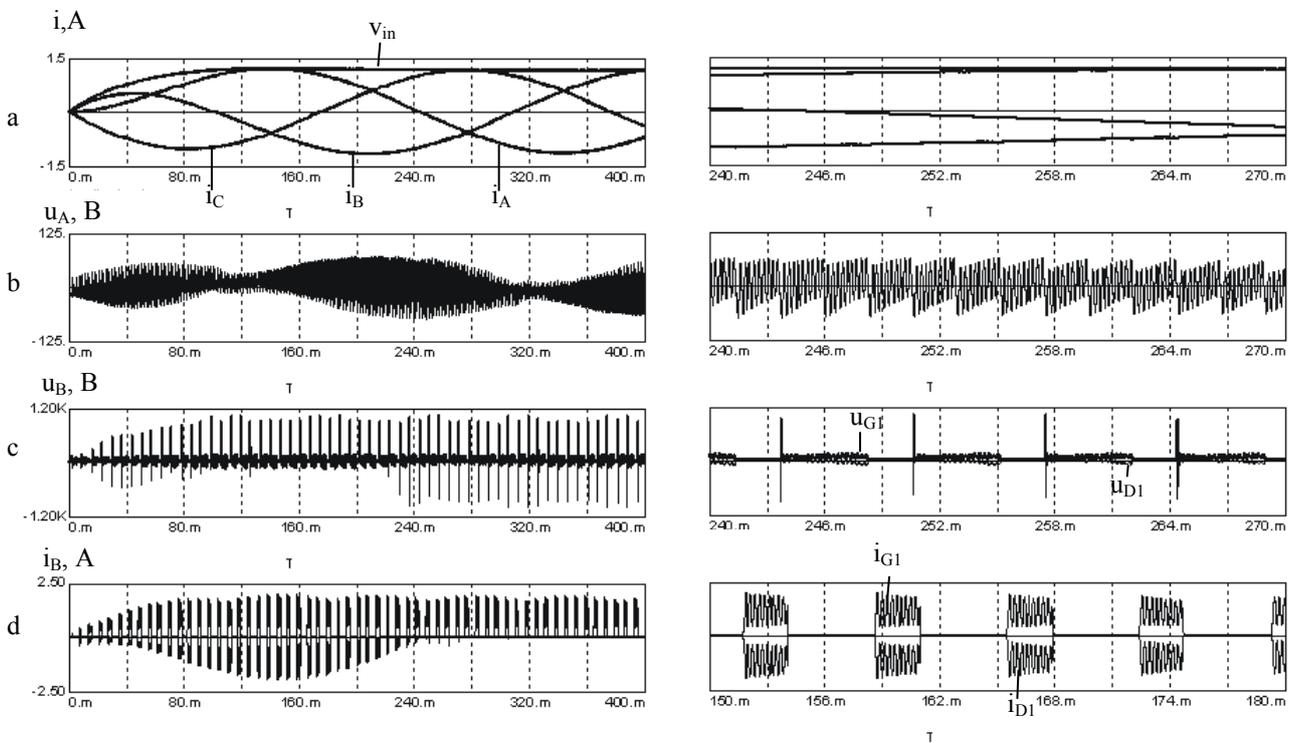


Рис. 6

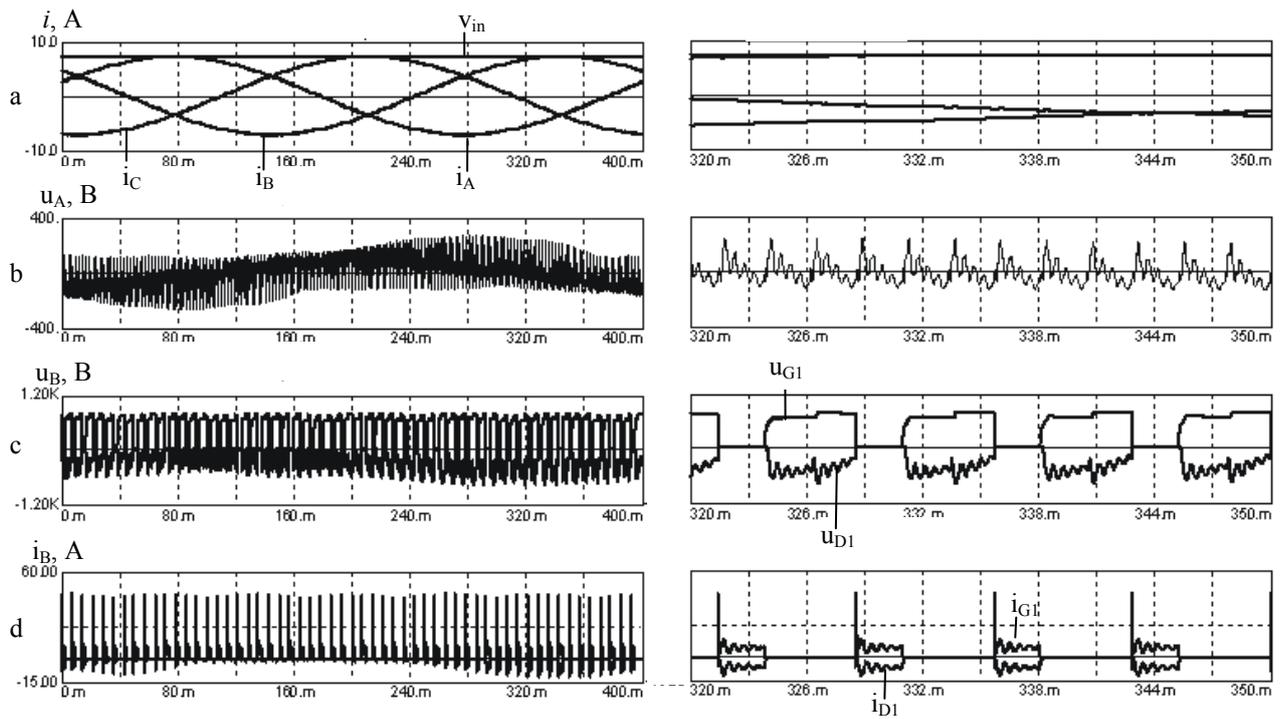


Рис. 7

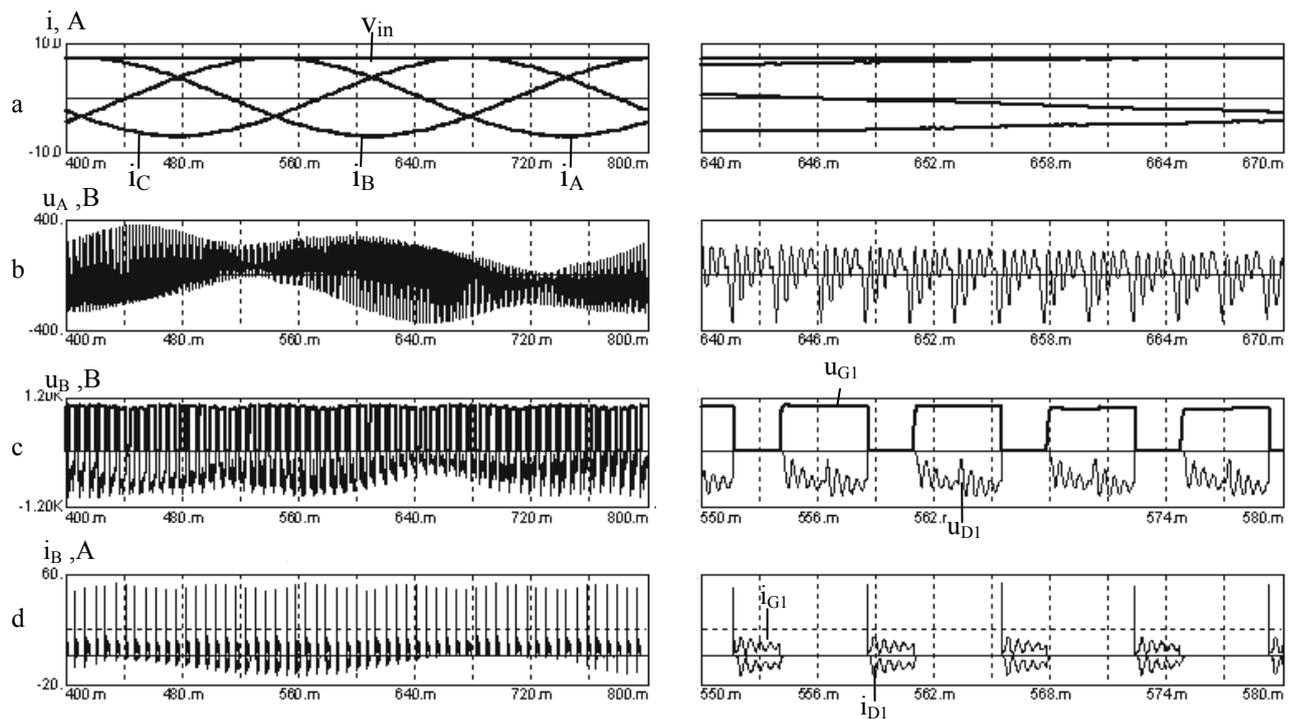


Рис. 8

наибольшая амплитуда обратного тока через диод меньше 1% от тока короткого замыкания выпрямителя. Если в выпрямителе не применять защиту диодов, то при переходе тока через ноль коммутационные перенапряжения на диоде могут в несколько раз превысить напряжение холостого хода выпрямителя.

Теперь нетрудно себе представить величину коммутационных перенапряжений на диодах трех-

фазного мостового выпрямителя (рис. 5) без защиты диодов при разрыве номинального тока через диод транзистором. Перенапряжения превышают амплитуду ЭДС источника в десятки раз. На величину перенапряжений влияет повышенная реактивность коммутации ЭМВП.

Для защиты от перенапряжений параллельно вентилю подключают  $R_f C_f$  – цепи. Расчет защитных

цепей выполняется из условий ограничения повторяющихся перенапряжений на вентиле на заданном уровне [1 ÷ 3]. В работе [12] приведен метод расчета защитных  $R_f C_f$ -цепей вентиля вращающегося трехфазного мостового преобразователя бесконтактной синхронной машины по коммутационным перенапряжениям на вентилях в переходных режимах.

Минимальное значение емкости  $C_f$  определяется из условия поглощения энергии, которая накапливается в индуктивности источника питания  $L_i$  [12]:

$$C_{f \min} = \tau^2 / 2L_i. \quad (8)$$

Активное сопротивление фильтра определяется по границе периодического и аperiodического режимов защитной цепи [12]:

$$R_f = \sqrt{2} \cdot \tau / C_{f \min}. \quad (9)$$

Постоянная времени  $R_f C_f$ -цепи

$$\tau_{RC} = \sqrt{2} \cdot \tau. \quad (10)$$

При этих параметрах наибольшая величина напряжения нагрузки выпрямителя превышает амплитуду линейного напряжения источника примерно на 30%. При  $C_f \approx 2C_{f \min}$  напряжение на нагрузке во всех режимах работы выпрямителя не превышает  $2 \cdot A_i$ . Коммутационные перенапряжения практически отсутствуют при  $C_f = 5C_{f \min}$  [12].

Очевидно, что величина емкости защитной цепи диодов в преобразователе частоты будет намного больше  $C_{f \min}$ . Увеличивая величину  $C_f$ , сохраняем

$$\tau_{RC} \approx \sqrt{2} \cdot \tau.$$

Для определенной величины  $C_f$  исследуем преобразователя при  $f_u < f_i$  и  $f_u > f_i$ . При исследованиях в установившемся режиме работы записываем диаграммы напряжений и токов, измеряем мощности и потери на элементах преобразователя, определяем коэффициент искажения тока источника, коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя.

Величины мощностей и токов определены по текущим средним значениям переменной при интегрировании по времени [8, 11]. Для устранения ошибки за счет участка переходного режима вначале рассчитываем выпрямитель до установившегося режима. Время счёта должно содержать целое число периодов частоты источника. Записываем значения величин по последней точке счёта. Проводим расчёт, начиная с показаний фиксированной точки.

Мощность нагрузки

$$P_n = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{m_n} i_{ni}^2 \right) \cdot R_n dt, \quad (11)$$

где  $i_{ni}$  – ток нагрузки  $i$ -й фазы,  $R_n$  – сопротивление нагрузки.

Действующая величина фазного тока нагрузки

$$I_n = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\frac{1}{m_n} \sum_{m_n} i_{ni}^2} dt, \quad (12)$$

где  $m_n = 3$  – число фаз нагрузки.

Активная мощность источника

$$P_i = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{m_i} e_{ii} \cdot i_{ii} \right) dt \right] dt, \quad (13)$$

где  $e_{ii}$  – ЭДС  $i$ -й фазы источника,  $m_i = 3$  – число фаз источника.

Реактивная мощность источника

$$Q_i = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{m_i} e'_{ii} \cdot i_{ii} \right) dt \right] dt, \quad (14)$$

где  $e'_{ii}$  – ЭДС  $i$ -й фазы дополнительного источника, у которого амплитуда ЭДС равна амплитуде ЭДС источника, а фаза ЭДС сдвинута на угол  $-90^\circ$ .

Суммарная мощность источника

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}. \quad (15)$$

Действующее значение первой гармоники тока источника

$$I_1 = S_i / m_i E_i. \quad (16)$$

Действующее значение полного тока источника

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\frac{1}{m_i} \sum_{m_i} i_{ii}^2} dt \right] dt. \quad (17)$$

Коэффициент искажения

$$\lambda = I_1 / I. \quad (18)$$

Потери в источнике

$$p_i = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{m_i} i_{ii}^2 \right) \cdot R_i dt, \quad (19)$$

где  $i_{ii}$  – ток  $i$ -й обмотки трех трехфазных групп,  $R_i$  – сопротивление источника.

Потери на диодах

$$p_D = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{n_D} u_{Di} \cdot i_{Di} \right) dt, \quad (20)$$

где:  $n_D = 18$  – общее число диодов;  $u_{Di}$  и  $i_{Di}$  – напряжение и ток на  $i$ -том диоде.

Потери на транзисторах:

$$p_G = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{n_G} u_{Gi} \cdot i_{Gi} \right) dt, \quad (21)$$

где:  $n_G = 3$  – число транзисторов;  $u_{Gi}$ ,  $i_{Gi}$  – напряжение и ток  $i$ -го транзистора.

Потери в фильтре

$$p_f = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{n_f} i_{fi}^2 \right) \cdot R_{fi} dt \right] dt, \quad (22)$$

где:  $n_f$  – общее число фильтров;  $i_{fi}$  – ток через  $i$ -й фильтр;  $R_{fi}$  – сопротивление  $i$ -того фильтра.

Суммарные потери

$$p_\Sigma = p_i + p_D + p_G + p_f. \quad (23)$$

КПД преобразователя

$$\eta = P_n / P_i. \quad (24)$$

На рис. 7 и 8 приведены диаграммы напряжений и токов преобразователя при:  $C_f = 0.3 \cdot 10^{-6}$  Ф;  $R_f = 30$  Ом;  $A_i = 120,8$  В;  $f_{u1} = 140$  Гц (рис. 7);  $f_{u1} = 145$  Гц (рис. 8). Другие параметры без изменений. Обозначение

ния величин аналогичны рис. 6. В таблице 1 приведены результаты расчетов преобразователя.

Таблица 1

№ п/п	Величина	ед. изм.	$p_b / p = 3, s = 0.025$ $f_i = 142.5, f_n = 2.5, \text{Гц}$	
			$f_u < f_i$	$f_u > f_i$
1	$P_n$	Вт	658	654
2	$I_n$	А	7.085	7.064
3	$P_i$	Вт	797	896.5
4	$Q_i$	ВАР	1618	232
5	$S_i$	ВА	1803	926
6	$I_1$	А	7.037	3.62
7	$I$	А	8.151	5.93
8	$\lambda$	-	0.8633	0.6105
9	$p_{ri}$	Вт	36	42.2
10	$p_D$	Вт	10.2	12.5
11	$p_G$	Вт	12.9	18.2
12	$p_f$	Вт	79.9	169.6
13	$p_{nc}$	Вт	103	200.3
14	$\Sigma p$	Вт	139	242.5
15	$\eta$	-	0.8256	0.7295
16	$u_{n \max}$	В	270.5	284
17	$u_{D \max}$	В	772	1001
18	$u_{G \max}$	В	772	1000
19	$i_{G \max}$	А	44.57	53.2

Приведем кратко анализ результатов исследования модели НПЧИ при нагрузке с отстающим коэффициентом мощности  $\cos\phi_n = 0.7$  и двух алгоритмах управления: 1)  $f_u < f_i$ ; 2)  $f_u > f_i$ .

При  $f_u > f_i$  знаки реактивной мощности на входе и выходе НПЧИ противоположны [4]. Благодаря этому расчетная мощность преобразователя при  $f_u > f_i$  намного меньше, чем при  $f_u < f_i$ . Однако, необходимо учитывать, что при работе БАСМ с двухзонным изменением скорости вращения вала (ниже и выше синхронной)  $\cos\phi_n$  отстающий только при скольжении  $s > 0$ . При  $s < 0$   $\cos\phi_n$  опережающий. При этом расчетная мощность преобразователя возрастает.

При  $f_u > f_i$  резко ухудшается качество формы выходного напряжения, увеличиваются коммутационные перенапряжения, потери на элементах преобразователя, снижается КПД ( $\eta$ ). Потери на защитных цепях  $p_f$  составляют более 20% от мощности нагрузки, что примерно в 1000 раз превышает потери на фильтре обычного трехфазного выпрямителя. При этом коммутационное напряжение превышает амплитуду источника в 8 раз. При  $f_u < f_i$  потери и коммутационные перенапряжения преобразователя ниже. Однако, в целом технико-экономические показатели также неудовлетворительные.

По результатам исследований можно сделать следующий вывод.

Электромашинно-вентильный преобразователь частоты на базе синхронного возбудителя и трех диодных мостовых выпрямителей, которые закорачиваются тремя полностью управляемыми ключами, не может быть применен в системе возбуждения бескон-

тактной асинхронизированной машины в связи с большими коммутационными перенапряжениями и потерями в преобразователе.

Учитывая, что рассмотренный НПЧИ в БАСМ обеспечивает двухзонное регулирование тока возбуждения асинхронной машины, простоту преобразователя и его системы передачи управляющих импульсов на вращающуюся часть, целесообразен более широкий анализ работы преобразователя. Необходимы учет ЭДС обмотки якоря асинхронной машины, исследование работы НПЧИ при изменении направления передачи мощности через преобразователь, поиск новых схемных и аппаратных решений НПЧИ с ограниченным числом полностью управляемых ключей при улучшенных технико-экономических показателях.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sambergen K., Berechnung von Trägerspeichereffekt – Beschaltungen für Silizium – Cleurrichter und Thyristoren // ETZ – А. – 1965. – Bd 86, № 24.
- [2] Глух Е.М., Зеленев В.Е. Защита полупроводниковых преобразователей. – М.: – Энергия, 1970. – 152 с.
- [3] Жемеров Г.Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. – М.: – Энергия, 1977. – 280 с.
- [4] Бернштейн А.Я., Гусяцкий Ю.М., Кудрявцев А.В., Сарбатов Р.С. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
- [5] Джюджи Л., Пелли Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты: Теория, характеристики, применение. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 400 с.
- [6] Шакарян Ю. Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: "Энергоатомиздат", 1984. – 192 с.
- [7] А. С. SU 1534744 5Н02Р 9 / 14 Савельев Ю.Е., Быков С.В., Зозулин Ю.В., Козлов Ю.А. Устройство для возбуждения асинхронизированной синхронной машины. Бюл. №1, 08.01.90.
- [8] Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. – М.: – Горячая линия – Телеком, 2003. – 368 с.
- [9] Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Новые разработки по бесконтактным синхронным и асинхронизированным машинам // Новини енергетики. – 2003. – №5. – С. 49–54.
- [10] Галиновский А.М., Ленская Е.А. Метод расчета электромашинно-вентильных преобразователей с естественной коммутацией в переходных режимах // Технічна електродинаміка. – 2003. – №5. – С. 29–33.
- [11] Галиновский А.М., Ленская Е.А. Многофазные синхронные возбудители в бесконтактных системах возбуждения синхронных машин. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, №1, 2003, С. 98-105.
- [12] Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Методика расчета защитных цепей вентилей выпрямителя, Технічна електродинаміка, №4, 2005, с. 43-50.

Поступила 19.05.2006

## ДО ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ ІНДУКТОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Гречко М.В., Дяченко В.В.  
Гірничий факультет Української інженерно-педагогічної академії,  
Україна, 94000, Стаханов, вул. Тельмана, 53

*Розглянуто питання, які необхідно враховувати при конструюванні індукторних генераторів для автотранспорту.*

*Рассмотрены вопросы, которые необходимо учитывать при конструировании индукторных генераторов для автотранспорта.*

Індукторні машини набувають широкого застосування як генератори автотранспортних засобів. Індукторний генератор з зовнішньозамкнутим магнітним потоком (рис. 1), що утворюється обмоткою збудження (1) та наводить ЕРС в якірній обмотці (2) має досить значний опір магнітного ланцюга, що є однією з основних причин, обумовлюючих низькі питомі показники таких генераторів. Відомий клас індукторних генераторів з внутрішньозамкнутим магнітним потоком типу секцин (рис. 2). Перевагою генераторів такого типу є менший опір магнітного кола, менший лінійний розмір що визначає кращі питомі показники.

Крім того, ротор такого генератора може бути виконаний порожнім, що поліпшує умови охолодження та зменшує вагу генератора.

Можливість роботи з високими кутовими швидкостями дозволяє отримати достатньо високі енергетичні показники, що сягають кращих синхронних генераторів.

Ці обставини надають перспективу щодо використання таких типів машин у складі сучасних високооборотних двигунів внутрішнього згорання [1].

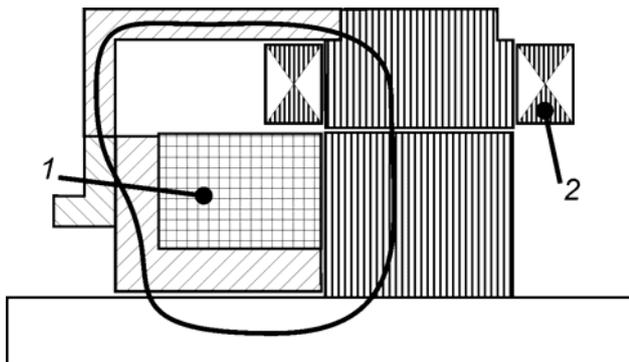


Рис. 1. Конструкція індукторних генераторів з зовнішньозамкнутим магнітним потоком (лінією наведено шлях по якому замикається магнітний потік)

Потужність генераторів є функцією частоти та для індукторних машин такого класу залежить від числа зубців на роторі  $Z_2$ . Якщо виходити з можливості використання генератора у складі автотранспортного засобу, то слід враховувати, що окремі види (класи) транспортних засобів облаштовані двигунами внутрішнього згорання з певним діапазоном кутових частот  $\omega_{\min} \dots \omega_{\max}$ , що визначаються як можливостями двигунів внутрішнього згорання, так і їх призначен-

ням та особливостями експлуатації АТЗ. При цьому кожен з транспортних засобів, в залежності від призначення, можна охарактеризувати середньою кутовою швидкістю  $\omega_{\text{ср}}$ . Так, для автотранспортних засобів з карбюраторним двигунами, які експлуатуються в умовах міста,  $\omega_{\text{ср}}$  рідко перебільшує  $2500 \dots 3000 \text{ хв}^{-1}$ , для дизельних двигунів  $1500 \dots 2000 \text{ хв}^{-1}$ . В той же час, тенденція розвитку двигунів сучасного легкового автомобіля характеризується освоєнням все більш високих кутових швидкостей ( $6000 \dots 12000 \text{ хв}^{-1}$  і вище), що призводить до зростання середньої кутової швидкості.

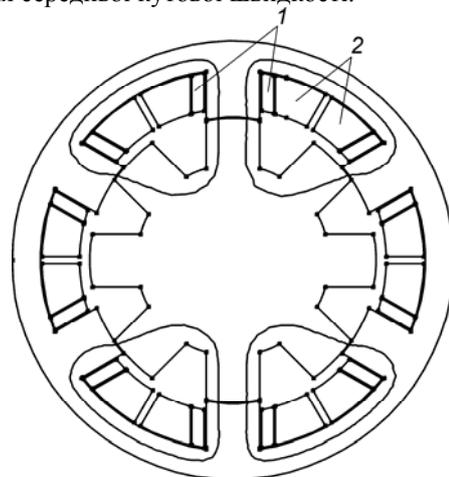


Рис. 2. Конструкція індукторних генераторів з внутрішньозамкнутим магнітним потоком (лінією наведено шлях по якому замикається магнітний потік)

Слід також підкреслити тенденцію щодо росту потужності електрообладнання АТЗ.

Можна зробити висновок, що при проектуванні індукторних машин, поперед за все, необхідно враховувати призначення транспортного засобу, керуючись при цьому середньою експлуатаційною кутовою швидкістю та необхідною потужністю, що споживається.

Кінцевою метою проектування автотранспортних генераторів є отримання максимальних питомих показників при мінімальних економічних затратах.

Як відомо, максимальна потужність генератора є добутком числа фаз, головних розмірів генератора, діапазону кутових швидкостей, максимальним зна-

ченням індукції в повітряному зазорі і лінійним навантаженням [2]

$$p = D^2 \cdot l \cdot n \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot k.$$

По суті, при конструюванні генераторів задача зводиться до досягнення компромісу між окремими конструктивними параметрами і економічними показниками, що відображається цільовою функцією.

$$G = \frac{P_{\text{ПИТ max}}}{C_{\text{min}}},$$

де  $P_{\text{ПИТ max}}$  - максимально досяжна питома потужність  $P_{\text{ПИТ}} = f(m, f, \Phi, I, W)$ ;

$C_{\text{min}}$  - економічні витрати  $C_{\text{min}} = f(C_{\text{матер}}, C_{\text{вироб}}, C_{\text{експ}})$ .

Під економічними витратами у даному випадку ми розуміємо вартість активних матеріалів, витрати на виробництво і експлуатаційні витрати.

Як відомо, з ростом частот, що генеруються збільшуються втрати в сталі, а також внаслідок поверхневого ефекту втрати в міді. Це змушує використовувати більш якісні і, відповідно, більш дорогі матеріали, а також спеціальні схемні рішення для зниження поверхневого ефекту, що призводить до збільшення собівартості одиниці продукції.

Можна підкреслити як позитивний фактор ту обставину, що експлуатаційні витрати індукторних генераторів (ІГ) практично не залежать від окремих конструктивних рішень і залишаються сталими, а в силу безконтактності конструкції меншими, ніж, наприклад, у контактних синхронних генераторів.

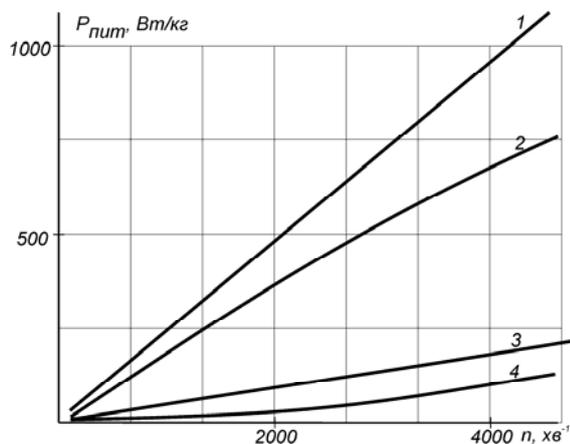


Рис. 3. Залежності електромагнітної (1), корисної (2) потужностей, втрат в сталі  $\delta=0,5$  мм на перемагнічування (3) та вихрові струми (4) в функції частоти обертання для  $m=3$

При конструюванні автотранспортних генераторів приходится зважати на те, що ряд конструктивних і технічних параметрів завдані жорстко і визначаються, зокрема, видом і призначенням транспортного засобу.

Так, наприклад, автомобільні генератори мають обмеження як по головним розмірам, так і по експлуатаційним (температурним, шумовим, вібраційним) режимам.

З вищенаведеного аналізу можна зробити висновок, що конструювання генератора для автотранспортного

засобу зводиться до пошуку технічного і схемного рішення, яке забезпечує отримання найкращих питомих показників при заданих конструктивних обмеженнях.

Розглянемо для прикладу варіант генератора з різним числом зубців на роторі  $Z_2$ . У випадку багатофазної машини співвідношення числа зубців ротора і статора буде визначати кількість фаз машини. При  $Z_1=12$  і  $Z_2=8$  число фаз  $m=3$  (рис. 3, 4), при  $Z_1=12$  і  $Z_2=9$  -  $m=4$  (рис. 5). При однакових: діаметрі  $D$ , довжині активної частини  $l_i$  на одних і тих же кутових швидкостях генератор  $Z_1=12$  і  $Z_2=9$  генерує ЕРС частотою в 1,25 рази більшу ніж при  $m=3$ .

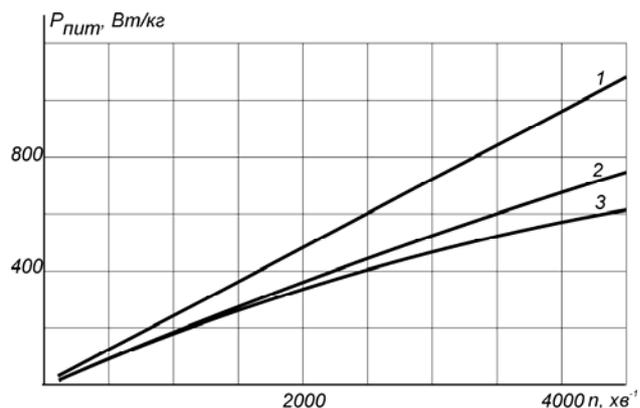


Рис. 4. Залежності електромагнітної (1) та корисних потужностей для сталей  $\delta=0,35$  мм (2) і  $\delta=0,5$  мм (3) для  $m=3$

Відомо [3], що електромагнітна потужність індукторного генератора визначається

$$P = m \cdot E \cdot I, \quad E = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot k_W \cdot W \cdot \Phi.$$

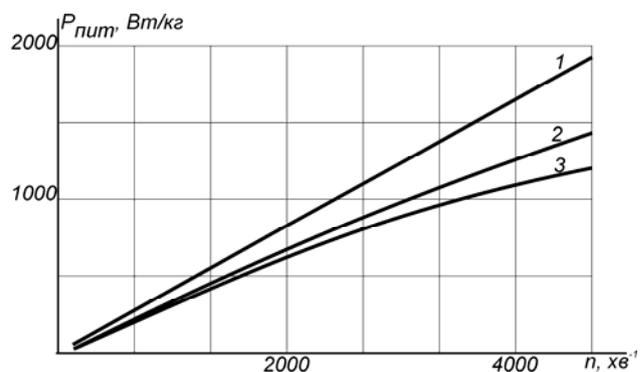


Рис. 5. Залежності електромагнітної (1) та корисних потужностей для сталей  $\delta=0,35$  мм (2) і  $\delta=0,5$  мм (3) для  $m=4$

Частота ЕРС наведена в обмотці якоря індукторного генератора не залежить від конфігурації зубцевої зони, а визначається тільки числом зубців ротора та швидкістю його обертання

$$f = \frac{Z_2 \cdot n}{60}.$$

Корисна потужність, що знімається з генератора, буде менше електромагнітної потужності на величину втрат, які також є функцією як частоти, так і струму.

Їх можна поділити на втрати в сталі (гістерезисні втрати  $P_{\Pi} = \eta_{Ж} \cdot B^{1,6} \cdot f \cdot V$  та вихрові струми  $P_i = \frac{1,67}{\rho_c} \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot \Delta^2 \cdot V$ ) і втрати в міді. Останні також можуть мати функціональну залежність від частоти внаслідок прояву поверхневого ефекту. Однак для частот, що не перевищують 800...1000 Гц впливом цього ефекту можна знехтувати.

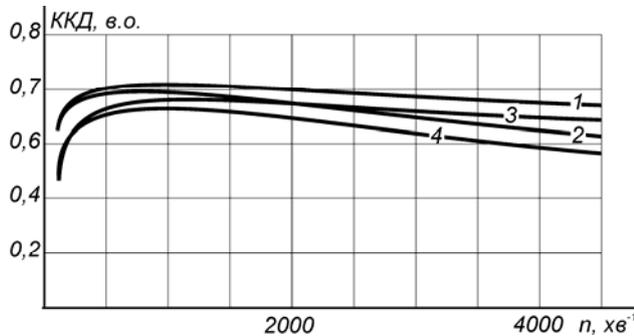


Рис. 6. Залежності ККД від частоти обертання для  $m=4$  (1 -  $\delta=0,35$  мм, 2 -  $\delta=0,5$  мм) та  $m=3$  (3 -  $\delta=0,35$  мм, 4 -  $\delta=0,5$  мм)

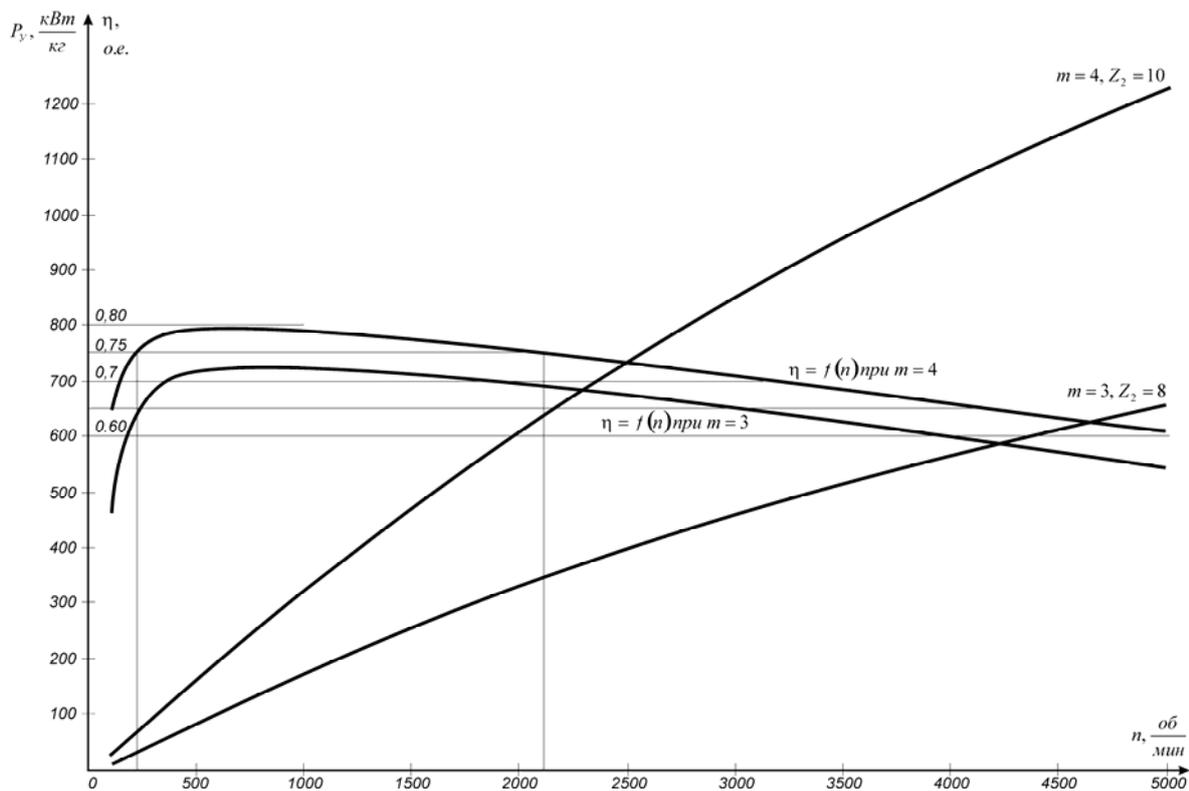


Рис. 7. Функції на залежність питомої потужності від частоти обертання та числа фаз генератора

### ВИСНОВКИ

1. Індукторні генератори типу секцин можуть бути альтернативою контактним синхронним автотранспортним генераторам.
2. При проектуванні індукторних генераторів з максимальними питомими показниками слід керуватися економічною доцільністю.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Гречко М.В., Дяченко В.В. Перспективи використання вентильних електричних машин у автотранспортних засобах// Вісник СХУ. – 2004. – №12. – С. 66-69.
- [2] Альпер Н.Я., Терзян А.А. Индукторные генераторы. М., Энергия, 1970, 192 с.
- [3] Постников И.М. Проектирование электрических машин. К., государственное издательство технической литературы УССР, 1960, 910 с.

Надійшла 27.01.2006

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХУРОВНЕВОГО ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНОГО ЗАЕМЛИТЕЛЯ ИЗ ОДИНОЧНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Гуль В.И., к.т.н., проф., Нижевский В.И., к.т.н., доц., Нижевский И.В.  
 Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Передача электрической энергии",  
 тел. (0572) 707-69-77

*Приведені результати досліджень по подальшому розвитку методів розрахунку електричних характеристик заземлюючих пристроїв. Показано, що ці характеристики одержані для однорідної і неоднорідної структури ґрунту. Запропоновано узагальнене математичне визначення опору розтіканню і потенціалу в будь-якій точці напів-простору ґрунту. Одержані формули для розрахунку електричних характеристик двохуровневого еквіпотенціального заземлювача.*

*Приведены результаты исследований по дальнейшему развитию методов расчета электрических характеристик заземляющих устройств. Показано, что эти характеристики получены для однородной и неоднородной структуры грунта. Предложено обобщенное математическое определение сопротивления растеканию и потенциала в любой точке полупространства грунта. Получены формулы для расчета электрических характеристик двухуровневого эквипотенциального заземлителя.*

Использование земли как элемента электрической цепи электротехнических объектов имеет широкое распространение. В зависимости от конкретных обстоятельств создание электрической связи с землей, т.е. заземление, имеет различающиеся цели. Так, рабочее заземление обеспечивает необходимый по условию нормального режима электроустановки уровень потенциала в точках заземления цепей, а также организует использование земли как пути для тока такого режима. Заземление молниезащиты создает контролируемый путь стекания тока молнии в землю. Физическое заземление применяется для уравнивания на близком к нулю уровне потенциалов корпусов, экранов и цепей физических приборов и установок в научных лабораториях, для ЭВМ.

Заземление некоторой физической точки, принадлежащей объекту или цепи, фактически обозначает образование проводимости или переходного сопротивления между точкой и грунтом с помощью электрода, введенного в электрический контакт с грунтом.

Деятельность человека в подавляющем большинстве случаев связана с многометровым слоем земли вглубь от так называемой дневной поверхности. Для инженерных задач удобно в пределах такого слоя классифицировать грунты как частные физико-химические формы общего понятия земли.

Размеры электрода из металла (в редких случаях из углеродосодержащих композиций) и электрические свойства грунтов определяют основные электрические характеристики заземления: сопротивление  $R_3$  (растеканию) заземления как отношение потенциала  $U_3$  точки ввода тока  $I$  в заземлитель к этому току и распределение потенциалов  $U_x$  на поверхности земли вблизи заземляемого объекта. Распределение  $U_x$  зависит от конструкции электродов заземлителя, от грунтов и потенциалов  $U_3$  и определяет условия электробезопасности. В режиме, известном как поражение человека напряжением прикосновения  $U_{пр}$ , допустимые ограничения последствия такого поражения достигаются нормиро-

ванием наибольших величин  $U_{пр}$ : международные рекомендации по величинам  $U_{пр}$  даны в Публикации 479 МЭК "Воздействие тока, проходящего через тело человека".

Широкий круг вопросов, связанных с заземлением, соотносится с двумя проблемами: первая - конструирование заземлителя (в общем случае заземляющего устройства ЗУ) под заданные параметры  $U_3$  (или  $R_3$  при расчетном токе  $I_3$ ) и  $U_{пр}$  и вторая - экспериментальный контроль достижения заданных параметров на данном ЗУ.

Возможности расчета ЗУ связаны с первой проблемой.

Рассматриваем две основные характеристики заземлителя: сопротивление растеканию  $R$  в месте ввода тока и потенциал на поверхности грунта в окрестностях заземлителя  $\varphi(M)$ . В общем виде точка  $M$  может находиться в объеме полупространства грунта.

Для горизонтального электрода в однородном грунте (рис. 1) известно по ряду работ описание  $R_{Г}$  (1) и  $\varphi(M)$  (2), в частности на поверхности грунта ( $Z = 0$ ).

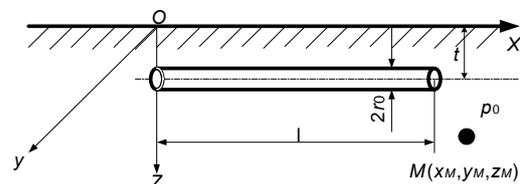


Рис. 1. Горизонтальный цилиндрический электрод, расположенный ниже поверхности земли

$$R_{Г} = \frac{\rho_0}{4\pi l} \times \ln \frac{[0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + r_0^2}] \cdot [0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + r_0^2 + (2t)^2}]}{[-0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + r_0^2}] \cdot [-0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + r_0^2 + (2t)^2}]} ; \quad (1)$$

$$\varphi(M) = \frac{I_3}{4 \cdot \pi \cdot \gamma_0 \cdot l} \times \ln \frac{(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + a^2}) \cdot (l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + b^2})}{(-x_M + \sqrt{x_M^2 + a^2}) \cdot (-x_M + \sqrt{x_M^2 + b^2})} , \quad (2)$$

где

$$a^2 = y_M^2 + (z_M - t)^2$$

$$b^2 = y_M^2 + (z_M + t)^2$$

Обычно  $(r_0/0,5 \cdot l) < 10^{-2}$ , а  $(2 \cdot t/0,5 \cdot l) < 0,4$ . При этом

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \frac{l^2}{2 \cdot r_0 \cdot t} + 0,5 \ln \left( 1 + \frac{4 \cdot t^2}{l^2} \right) \right]. \quad (3)$$

При двух электродах, расположенных на разных глубинах укладки  $t$  (рис. 2), сопротивление системы учитывает взаимозащитывание равнопотенциальных электродов 1 и 2.

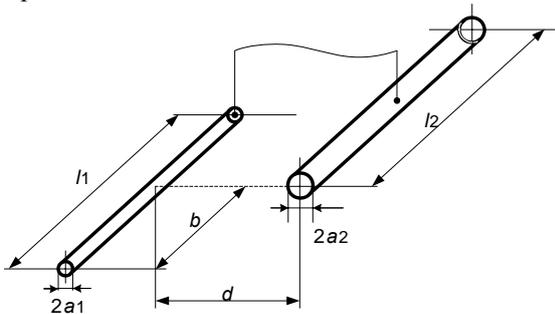


Рис. 2. Общий случай уединенного проводника, образованного соединением двух параллельных прямых проводов

Как отмечает Якобс А.И. [1], начиная с середины 30-х годов (Вайнер А.Л. – 1931 г., 1938 г.; Оллендорф Ф. – 1932 г. и др.), в качестве основного инженерного метода расчета сопротивления сложных заземлителей по заданным их геометрии и параметрам электрической структуры земли широко применяли коэффициенты использования. Идея этого метода заключается в расчете собственных сопротивлений  $\alpha_{pp}$  элементов сложных заземлителей и в учете их взаимного влияния на результирующее сопротивление  $R_3$  или на проводимость  $G_3$  в общем случае одним безразмерным параметром  $\eta$ , названным коэффициентом использования. Численно коэффициент использования равен отношению проводимости  $G_3$  к сумме проводимостей  $g_p$  всех его элементов при отсутствии взаимного влияния между ними (это возможно лишь в гипотетическом случае, когда все элементы сложного заземлителя находятся друг от друга на достаточно большом, теоретически бесконечном, расстоянии и электрически связаны между собой идеальными изолированными проводниками)

$$\eta = \frac{G_3}{\sum_{p=1}^n g_p},$$

где  $n$  - число элементов сложного заземлителя.

Коэффициенты использования, являясь сложными функциями геометрических параметров заземлителей и параметров электрической структуры земли, отражают взаимное потенциальное влияние элементов сложного заземлителя интегрально (обобщенно).

Сопротивление заземлителя в виде системы электродов 1 и 2 является, естественно, обратной величиной суммарной проводимости растеканию:

$$G_{1-2} = G_1 + G_2 - 2 \cdot G_{12}. \quad (4)$$

Результат взаимозащитывания в нашем случае равнопотенциальных электродов, т.е. величину  $G_{1-2}$ , оценим, применив метод электростатической аналогии к расчету сложных заземлителей (Воробьев В.И., 1934 г.). Метод широко используется и в настоящее время. Так,

$$R = G^{-1} = \varepsilon / (\gamma \cdot C), \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды, в которой рассчитывается емкость электродной системы, а  $\gamma$  - удельная объемная проводимость среды с теми же электродами. Взаимный потенциальный коэффициент для системы электродов по рис. 2 рекомендуется [2] рассчитывать при  $b = 0$  как

$$\alpha_{12} \cong \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l_2} \cdot \left[ \frac{\text{Arsh} \frac{l_1}{d} + \frac{l_2}{l_1} \cdot \text{Arsh} \frac{l_2}{d} - \left( \frac{l_2 - l_1}{l_1} \right) \cdot \text{Arsh} \frac{l_2 - l_1}{d} + \frac{d}{l_1}}{\sqrt{\left( \frac{d}{l_1} \right)^2 + \left( \frac{l_2 - l_1}{l_1} \right)^2} - \sqrt{\left( \frac{d}{l_1} \right)^2 + 1} - \sqrt{\left( \frac{d}{l_1} \right)^2 + \left( \frac{l_2}{l_1} \right)^2}} \right], \quad (6)$$

где  $l$  и  $d$  в метрах;  $\varepsilon = (36 \cdot \pi)^{-1} \cdot 10^{-9}$ , Ф/м.

Однородность грунта позволяет принять  $\gamma$  [Ом·м]<sup>-1</sup> известной при подстановке в (5) взаимной емкости  $C_{вз} = (\alpha_{12})^{-1}$ .

Потенциал  $\phi(M)$  в точке  $M$  для рассматриваемой системы электродов находим путем суммирования потенциалов от электродов 1 и 2, используя (2).

При потенциале точки ввода  $\phi(0)$  в систему вводится ток  $I_0$ , который распределится пропорционально эффективным проводимостям электродов  $G_{1\phi} = G_1 - G_{12}$  и  $G_{2\phi} = G_2 - G_{12}$ . Знание токов  $I_1$  и  $I_2$  достаточно для расчета  $\phi(M)$  по выражению (2).

Объем вычислений для определения характеристик заземлителя в двухслойном грунте значительно возрастает. Действительно, следуя работам Бургсдорфа В.В. и Якобса А.И. для расположения горизонтального электрода в верхнем слое (рис. 3) рекомендовано использовать выражения (7) и (8).

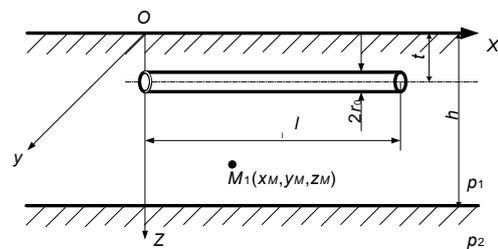


Рис. 3. Горизонтальный электрод, расположенный в верхнем слое двухслойной электрической структуры земли

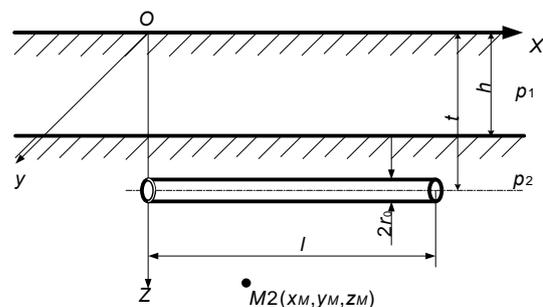


Рис. 4. Горизонтальный электрод, расположенный в нижнем слое двухслойной электрической структуры земли

$$\begin{aligned}
\Phi_{M1}(x_M, y_M, z_M) = & \\
= & \frac{I_3 \cdot \rho_1}{4 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \frac{\left( l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (z_M - t)^2} \right) \times}{\left( -x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (z_M - t)^2} \right) \times} \rightarrow \right. \\
& \times \frac{\left( l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (z_M + t)^2} \right)}{\left( -x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (z_M + t)^2} \right)} + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n \left[ \ln \frac{\left( l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2n \cdot h + z_M - t)^2} \right) \times}{\left( -x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2n \cdot h + z_M - t)^2} \right) \times} \rightarrow \right. \\
& \times \frac{\left( l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2n \cdot h + z_M + t)^2} \right)}{\left( -x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2n \cdot h + z_M + t)^2} \right)} + \\
& + \ln \frac{\left( l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2n \cdot h - z_M + t)^2} \right) \times}{\left( -x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2n \cdot h - z_M + t)^2} \right) \times} \rightarrow \\
& \left. \left. \times \frac{\left( l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2n \cdot h - z_M - t)^2} \right)}{\left( -x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2n \cdot h - z_M - t)^2} \right)} \right] \right\}. \quad (7)
\end{aligned}$$

Сопротивление такого электрода находим с учетом малого значения  $r_0$  по сравнению с  $0,5 \cdot l$

$$\begin{aligned}
R_{\Gamma} = & \frac{\Phi_{M1}(0,5 \cdot l, r_0, t)}{I_3} = \\
= & \frac{\rho_1}{4 \cdot \pi \cdot l} \left\{ 2 \ln \frac{l}{r_0} + \ln \frac{0,5l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t)^2}}{-0,5l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t)^2}} + \right. \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n \left[ \ln \frac{\left( 0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h + 2 \cdot t)^2} \right) \times}{\left( -0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h + 2 \cdot t)^2} \right) \times} \rightarrow \right. \\
& \times \frac{\left( 0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h - 2 \cdot t)^2} \right)}{\left( -0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h - 2 \cdot t)^2} \right)} + \\
& \left. + 2 \ln \frac{0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h)^2}}{-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h)^2}} \right] \left. \right\}. \quad (8)
\end{aligned}$$

Коэффициент  $k_{21} = (\rho_2 - \rho_1)(\rho_1 + \rho_2)$ , число учитываемых членов суммы принято оценивать по критерию достаточности

$$\Delta = \left| \frac{I^{(n-1)} - I^{(n)}}{I^{(n)}} \right| \leq \Delta_{\text{доп}},$$

где  $I^{(n)}$  - сумма при  $n$  слагаемых;  $\Delta_{\text{доп}} \approx$  до 5%.

Расположение заземлителя в нижней области  $\rho_2$  (рис. 4) приводит к расчетному выражению (9).

$$\begin{aligned}
R_{\Gamma} = & \frac{\rho_2}{4 \cdot \pi \cdot l} \left[ 2 \ln \frac{l}{r_0} - k_{2,1} \cdot \ln \frac{0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t - 2 \cdot h)^2}}{-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t - 2 \cdot h)^2}} + \right. \\
& + (1 - k_{2,1}^2) \cdot \ln \frac{0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2t)^2}}{-0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2t)^2}} + \\
& \left. + (1 - k_{2,1}^2) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n \cdot \ln \frac{0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t + 2n \cdot h)^2}}{-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t + 2n \cdot h)^2}} \right]. \quad (9)
\end{aligned}$$

Предположим, что электрод 1 находится в верхнем слое ( $\rho_1, t_1, h$ ), а электрод 2 - в нижнем слое ( $\rho_2,$

$t_2 > h$ ), как это показано на рис. 5. И в этой ситуации выражение (2) корректно, однако оценка  $G_{1-2}$  требует нового подхода. Предложено принять между электродами однородный грунт

$$\rho_{\text{однор}} = \frac{\rho_1 \cdot \Delta h_1 + \rho_2 \cdot \Delta h_2}{\Delta h_1 + \Delta h_2}, \quad (10)$$

где  $\Delta h_1 = h - t_1$ ;  $\Delta h_2 = t_2 - h$ .

Такое предложение делает возможным использование (6) при определенном  $\gamma_{\text{однор}}$ .

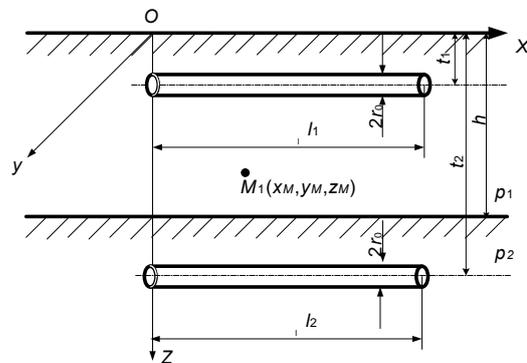


Рис. 5. Два горизонтальных электрода, расположенные один в нижнем, а второй в верхнем слое двухслойной электрической структуры земли

Следует отметить, что определение  $\phi(M)$  в верхнем слое для электрода в нижнем слое требует дополнительной разработки. В ряде случаев можно допустить как вариант размещение обоих электродов в верхнем слое, что предполагает использование (7) и (8) в условиях постоянства  $\rho_1$  и  $\rho_2$  как параметров структуры грунта.

Расширение исследования поставленной задачи приводит к учету смещения электродов, т.е.  $b \neq 0$  (рис. 2).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. - М.: Энергоатомиздат, 1987.- 400 с.
- [2] Иосель Ю.Я., Качанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости.- М.: Энергия, 1969.- 288 с.
- [3] Гуль В.И. Возможности упрощения заземляющих устройств //Вестник ХГПУ. Вып.112. - Харьков: ХГПУ, 2000.- С. 9-21.

Поступила 25.01.2006

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ ВОЗДУХА

Капинос В.М., д.т.н., проф.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Турбиностроение"  
тел. (057) 707-63-11, факс (057) 707-63-11

Навроцкий В.В., к.т.н., с.н.с.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Турбиностроение"  
тел. (057) 707-63-11, факс (057) 707-63-11, e-mail: navr@kpi.kharkov.ua

Смородская И.В., к.т.н., ст. преп.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Компьютерная математика и математическое моделирование", тел. (057) 707-63-51

*Приведено тепловий розрахунок електричного повітрянагрівача для експериментальної імпульсної газотурбінної установки з робочою температурою 1200°С.*

*Приведен тепловой расчет электрического воздушнонагревателя для экспериментальной импульсной газотурбинной установки с рабочей температурой 1200°С.*

Двумерное температурное поле прямоугольной области с равномерно распределенными источниками теплоты описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad (1)$$

где  $q_v$  - объемная мощность,  $\frac{Вт}{м^3}$ ;  $\lambda$  - теплопровод-

ность,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ .

Введем в рассмотрение среднеинтегральную температуру по толщине прямоугольной области (ленты толщиной  $\delta$ ) температуру

$$\theta = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} t dy. \quad (2)$$

Разделим уравнение (1) на  $\delta$  и проинтегрируем по  $y$  в пределах от 0 до  $\delta$ . Будем иметь

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{1}{\delta} \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)_0^{\delta} + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (3)$$

При симметричных граничных условиях 3-го рода

$$y = 0 \quad \alpha(t - \vartheta) = \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \quad (4)$$

$$y = \delta \quad \alpha(t - \vartheta) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y}, \quad (5)$$

где  $\vartheta$  - температура нагреваемой среды, уравнение (3) преобразуется к виду

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - \frac{2\alpha}{\lambda \delta} (t_{\delta} - \vartheta) + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (6)$$

Если принять, что температура на поверхности ленты  $t_{\delta}$  (при  $y = \delta$ ) равна среднеинтегральной температуре  $\theta$ , что хорошо выполняется для тонких тел, то уравнение (6) принимает вид

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - \frac{2\alpha}{\lambda \delta} (\theta - \vartheta) + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (7)$$

Дифференциальное уравнение для потока нагреваемого воздуха находим из уравнения теплового баланса для элемента потока на участке  $dx$

$$Q = C_p G \vartheta, \quad Q_2 = C_p G \vartheta + C_p G \frac{d\vartheta}{dx} dx,$$

$$Q_3 = 2\alpha(\theta - \vartheta)b_l dx,$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи на поверхности ленты, шириной  $b_l$ .

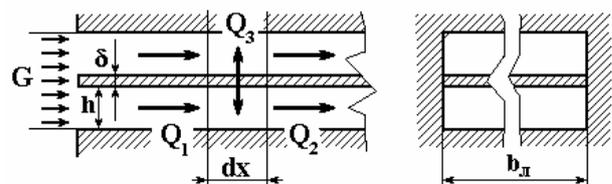


Рис. 1. К выводу уравнения теплового баланса для элемента потока воздуха

Уравнение баланса теплоты

$$Q_1 + Q_3 = Q_2$$

$$C_p \cdot G \cdot \frac{d\vartheta}{dx} = 2 \cdot \alpha \cdot b_l \cdot (\theta - \vartheta) \text{ или} \\ \frac{d\vartheta}{dx} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot b_l}{C_p \cdot G} \cdot (\theta - \vartheta). \quad (8)$$

Распределение температуры ленты  $\theta$  и воздуха  $\vartheta$  по длине канала  $x$  описывается системой уравнений

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - n^2(\theta - \vartheta) + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad n^2 = \frac{2\alpha}{\lambda\delta}, \quad (9)$$

$$\frac{d\vartheta}{dx} - p^2(\theta - \vartheta) = 0, \quad p^2 = \frac{2 \cdot \alpha \cdot b_l}{C_p \cdot G}. \quad (10)$$

Оценка величины слагаемых уравнения (9) свидетельствует о том, что значение  $\frac{d^2\theta}{dx^2}$  на несколько порядков меньше по сравнению с последующими двумя членами. Отсюда следует, что второй производной в уравнении (9) можно пренебречь. Этот вывод для распределения температуры в тонких пластинах известен (см., например [1], с. 282 – 285, где приведен расчет распределения температуры в полый охлаждаемой лопатке газовой турбины). Распределение температуры в тонкой оболочке и температуры охлаждающего воздуха, рассчитанные с учетом второй производной в уравнении (9) и без ее учета практически оказались неразличимыми.

В итоге будем иметь преобразованную систему уравнений, допускающую простое решение в виде

$$\frac{2\alpha}{\lambda\delta} \cdot (\theta - \vartheta) = \frac{q_v}{\lambda}, \quad (11)$$

$$\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot b_l}{C_p \cdot G} \cdot (\theta - \vartheta). \quad (12)$$

Из (11) следует, что  $\theta - \vartheta = \frac{q_v \cdot \lambda \cdot \delta}{2 \cdot \alpha}$ . Подставляя  $\theta - \vartheta$  в (12), имеем

$$\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{q_v \cdot b_l \cdot \delta}{C_p \cdot G}. \quad (13)$$

После интегрирования находим распределение температуры нагреваемого воздуха по длине канала

$$\vartheta = \frac{q_v \cdot b_l \cdot \delta}{C_p \cdot G} x + \vartheta_0, \quad (14)$$

где  $\vartheta_0$  значение начальной температуры воздуха при  $x = 0$ . Соответственно температура ленты нагревателя равна

$$\theta = \frac{q_v \cdot b_l \cdot \delta}{C_p \cdot G} x + \frac{q_v \cdot \delta}{2 \cdot \alpha} + \vartheta_0. \quad (15)$$

Этот результат можно уточнить, приняв во внимание зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воздуха, а также зависимость физических параметров воздуха  $\mu, \lambda_\epsilon, C_p, \text{Pr}$  (динамическая вязкость, теплопроводность, теплоемкость, число Пран-

дтля) от температуры.

Коэффициент теплоотдачи поверхности ленты определяется по формуле

$$\alpha = 0,021 \cdot \frac{\lambda_\epsilon}{d_\vartheta} \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43}, \quad (16)$$

где  $d_\vartheta = 2h$ ,  $h$  - высота канала для половинного расхода воздуха или другой размер в зависимости от формы канала,

$$w_\epsilon = \frac{0,5 \cdot G}{\rho \cdot h \cdot b_l} \text{ - скорость в канале,}$$

$$\text{Re} = \frac{w_\epsilon d_\vartheta \rho}{\mu(\vartheta)} = \frac{0,5 G d_\vartheta \rho}{\rho h b_l \mu(\vartheta)} = \frac{G}{b_l \mu(\vartheta)},$$

$\mu(\vartheta)$  - аппроксимация  $\mu$  в зависимости от температуры,  $\lambda_\epsilon(\vartheta)$  - аппроксимация  $\lambda$  в зависимости от температуры,  $\text{Pr}(\vartheta)$  - аппроксимация  $\text{Pr}$  в зависимости от температуры.

Тогда

$$\alpha(\vartheta) = 0,021 \frac{\lambda_\epsilon(\vartheta)}{2h} \left( \frac{G}{b_l \mu(\vartheta)} \right)^{0,8} \text{Pr}(\vartheta)^{0,93}. \quad (17)$$

При переменной  $C_p$  в виде линейной зависимости  $C_p = a\vartheta + b$  из уравнения (13) следует

$$\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{q_v b_l \delta}{G(a\vartheta + b)}. \quad (18)$$

Разделяем переменные и, интегрируя, будем иметь

$$\frac{a\vartheta^2}{2} + b\vartheta = \frac{q_v b_l \delta}{G} x + C.$$

При  $x = 0$   $C = \frac{a\vartheta_0}{2} + b\vartheta_0$ . Общий интеграл принимает вид

$$\frac{a\vartheta^2}{2} + b\vartheta - \frac{a\vartheta_0^2}{2} - b\vartheta_0 - \frac{q_v b_l \delta}{G} x = 0. \quad (19)$$

Решение этого уравнения находим зависимость температуры воздуха  $\vartheta$  от координаты  $x$

$$\vartheta = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 2a(\beta + \gamma x)}}{a}, \quad (20)$$

где  $\beta = \frac{a\vartheta_0^2}{2} + b\vartheta_0$ ,  $\gamma = \frac{q_v b_l \delta}{G}$ .

Из уравнения (11) и (20) совместно с (17) следует, что температура ленты нагревателя

$$\theta = \frac{q_v \delta}{2\alpha(\vartheta)} + \vartheta. \quad (21)$$

При этом принимается во внимание и переменность физических параметров  $\lambda_\epsilon(t)$ ,  $\mu(t)$ ,  $C_p(t)$ ,  $\text{Pr}(t)$ .

На рис.2 приведено распределение температуры нагреваемого воздуха для импульсной газотурбинной

установки с  $G = 0,05$  кг/с на рабочую температуру  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\vartheta_0 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В качестве исходных данных принято:

- длина ленты – 40 м,
- ширина –  $b_d = 23$  мм;
- толщина –  $\delta = 1$  мм;
- материал – сталь ХН45Ю;
- теплопроводность стали –  $\lambda = 24,3$  Вт/(м·К);
- удельное электрическое сопротивление стали –  $\rho = 1,48$  (Ом·мм<sup>2</sup>)/м;
- рабочее напряжение  $V = 440$  В.

Для  $\mu, \lambda_g, \rho_t$  воздуха приняты табличные значения, теплоемкость аппроксимирована уравнением  $C_p = 0,1833 \cdot \vartheta + 997$ , кДж/(кг·К).

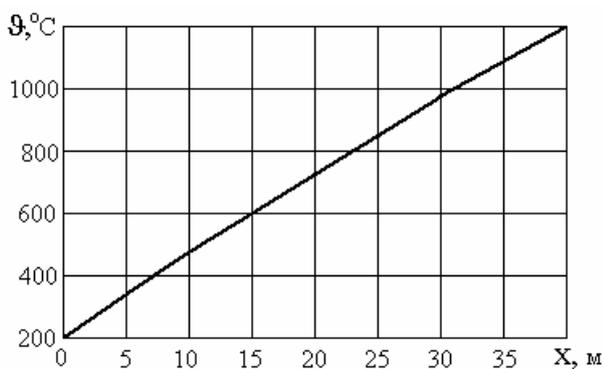


Рис. 2. Распределение температуры нагреваемого воздуха по длине канала

Конструктивно электронагреватель может быть выполнен в виде отдельных U-образных лент, соединенных последовательно. Такая компоновка позволяет уменьшить габариты нагревателя. Каждая лента (рис. 3) проходит внутри керамических электроизоляционных вставок, образующих воздушные каналы. Вставки размещаются внутри стальных труб, которые, в свою очередь, закреплены в общем корпусе.

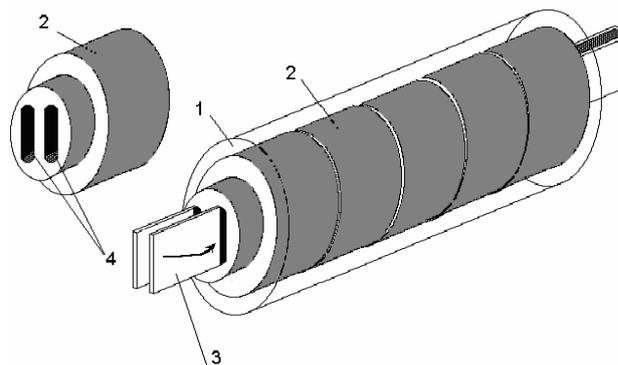


Рис. 3. Нагревательный элемент:  
1 – труба; 2 – электроизоляционная вставка;  
3 – стальная лента; 4 – воздушные каналы

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шнеэ Я.И., Капинос В.М., Котляр И.В. Газовые турбины. –Киев: Вища школа. 1974. Том 1. – 295 с.

Поступила 03.03.2006

## МЕХАНИЗМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ КОНТАКТНОЙ КОМПОЗИЦИИ

Павленко Т.П., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"

тел. (057) 707-68-64

*У роботі розглядаються фізичні процеси в кристалевій решітці, які впливають на механізм переміщення заряджених частиць та властивості композиційних контактних матеріалів. Цей механізм розкриває причини взбудження атомних стрибків, їх зміщення у рамках вакансії та міжвузлії, а також відображає вплив процесів дифузії та самодифузії.*

*В данной работе рассматриваются физические процессы в кристаллической решетке, которые влияют на механизм перемещения заряженных частиц и на свойства композиций контактных материалов. Данный механизм раскрывает причины возникновения атомных скачков, их смещение в пределах вакансии и междоузлиях, а также определяет влияние процессов диффузии и самодиффузии.*

### ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемый контактный материал, результаты исследования которого показаны в работах [1-3], обладает особыми эмиссионными свойствами, благодаря активирующей добавке. Взаимодействие этой добавки и материала-основы значительно уменьшает износ рабочей поверхности контакта.

Исследуя физические процессы на контактах новой композиции, автор пришел к выводу, что на характер износа рабочей поверхности контактов влияют не только внешние факторы, а главным образом – физические процессы внутри кристаллической решетки, которые влияют на работу выхода электронов, скорость движения дуги по рабочей поверхности, распределение температуры и т.д.

Для решения данной проблемы были поставлены следующие задачи:

- определение причины перемещения заряженных частиц в кристаллической решетке;
- определение частоты скачков в решетке.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе диффузии атомы кристаллов совершают скачки из одного узла решетки в другой. Существуют системы с малым содержанием примесей в основном металле, в которых примесный атом проводит большую часть времени в междоузлии, совершая малые колебания около своего равновесного состояния. Однако время от времени примесный атом в результате локальной флуктуации температуры поглощает большое количество энергии и перепрыгивает в соседнее междоузлие. Следовательно, примесь блуждает в кристалле по извилистой траектории, слагающейся из большого числа случайных скачков.

Аналогичным образом происходит смещение вакансий, причем элементарный скачок вакансии – это скачок соседнего с ней атома в пустой узел. Во всех этих случаях длина вектора смещения диффундирующего объекта за некоторый период времени равна сумме элементарных скачков одинаковой длины. Таким образом, если  $R$  – полное смещение диффундирующего объекта за единицу времени, то

$$R = \sum_{i=1}^{\Gamma} r_i, \quad (1)$$

где  $\Gamma$  – число атомных скачков в единицу времени;  $r_i$  – вектор элементарного скачка  $i$ .

Возведя обе части равенства (1) в квадрат, получим:

$$R^2 = \sum_{i,j} r_i \cdot r_j. \quad (2)$$

Перепишем последнее равенство, выделяя в сумме члены с  $i=j$  и  $i \neq j$

$$R^2 = \sum_{i=1}^{\Gamma} r_i^2 + \sum_{i \neq j} r_i \cdot r_j. \quad (3)$$

Вторую группу (3) выражаем следующим образом:

$$\sum_{i \neq j} r_i \cdot r_j = 2 \sum_{i=1}^{\Gamma-1} r_i \cdot r_{i+1} + 2 \sum_{i=1}^{\Gamma-2} r_i \cdot r_{i+2} + \dots, \quad (4)$$

Так что равенство (3) приобретает вид:

$$R^2 = \sum_{i=1}^{\Gamma} r_i^2 + 2 \sum_{j=1}^{\Gamma} \sum_{i=1}^{\Gamma-j} r_i \cdot r_{i+j}. \quad (5)$$

В кристалле все векторы  $r_i$  равны по модулю

$$r_i \cdot r_{i+j} = r^2 \cos \theta_{i,i+j}, \quad (6)$$

где  $\theta_{i,i+j}$  – угол между направлениями скачков  $i$  и  $i+j$ ; таким образом (5) запишется в следующем виде:

$$R^2 = \Gamma \cdot r^2 + 2r^2 \sum_{j=1}^{\Gamma-1} \sum_{i=1}^{\Gamma-j} \cos \theta_{i,i+j}. \quad (7)$$

В этом уравнении  $R$  – величина смещения мигрирующего объекта в единицу времени. Чтобы получить среднеквадратичное смещение, необходимо только усреднить уравнение (7) по набору из большого числа атомов, каждый из которых совершает  $\Gamma$  скачков в единицу времени. Результат усредненный имеет вид:

$$\langle R^2 \rangle = \Gamma \cdot r^2 \cdot f, \quad (8)$$

где  $f$  – фактор корреляции

$$f \equiv 1 + \frac{2}{\Gamma} \cdot \sum_{j=1}^{\Gamma-1} \sum_{i=1}^{\Gamma-j} \langle \cos \theta_{i,i+j} \rangle. \quad (9)$$

Его значение определяется типом кристаллической структуры и механизмом диффузии. Число скачков  $\Gamma$  довольно велико. В случае диффузии примеси внедрения в кристалле  $\langle \cos \theta \rangle = 0$ , т.к. каждому скачку атома в данном направлении соответствует возможный скачок в противоположном направлении. Диффузия осуществляется некоррелированным случайным блужданием атомов примеси. Это говорит о том, что последовательные скачки атомов примеси внедрения совершенно независимы. Эта независимость является следствием того обстоятельства, что частота скачков атомов много меньше, чем частота колебаний в кристалле. Таким образом, примесный атом находится в междоузлии достаточно долгое время.

Другая ситуация может возникнуть при диффузии меченого атома замещения, осуществляемой при помощи вакансионного механизма. После того, как меченый атом перескакивает в вакантный узел, вакансия все еще остается его ближайшим соседом. Вероятность того, что атом вернется в свое прежнее положение, больше, чем вероятность того, что он перепрыгнет в какой-то другой узел. Это означает, что вероятности совершения скачков в разных направлениях не равны друг другу и направление скачка зависит от направления предыдущего скачка. Таким образом,  $\langle \cos \theta \neq 0 \rangle$  и скачки являются коррелированными. Коэффициент диффузии определяется как:

$$D = \frac{f}{6} \cdot r^2 \cdot \Gamma. \quad (10)$$

В случае диффузии по междоузлиям  $f=1$ ,  $\Gamma=\Gamma_I$  - частота скачков по междоузлиям, а  $r=r_I$  - расстояние между соседними междоузлиями. Следовательно, коэффициент диффузии внедренных атомов равен:

$$D_I = \frac{r_I^2 \cdot \Gamma_I}{6} \text{ - (диффузия по междоузлиям),} \quad (11)$$

$$D_V = \frac{r_L^2 \cdot \Gamma_V}{6} \text{ - (диффузия по вакансиям),} \quad (12)$$

где  $r_L$  - расстояние между двумя ближайшими узлами решетки;  $\Gamma_V$  - частота скачков вакансий.

В случае самодиффузии, происходящей посредством вакансионного механизма, т.е. путем скачков атомов в пустой узел, частота  $\Gamma = \Gamma_V \cdot C_V$  ( $C_V$  - атомная доля вакантных узлов решетки). Это выражение справедливо, т.к. атом не может двигаться по решетке, если рядом с ним нет вакансии. Таким образом, в случае самодиффузии:

$$D_s = \frac{f \cdot r_L^2 \cdot \Gamma_V \cdot C_V}{6}. \quad (13)$$

Экспериментально обнаружено, что коэффициент диффузии зависит от температуры и давления. Тогда:

$$D = D_0 \cdot e^{-(Q^* + PV^*)/kT}, \quad (14)$$

где  $D_0, V^*, Q^*$  - постоянные предэкспоненциального множителя, активационного объема, энергии активации.

Таким образом, на условия перемещения заряженных частиц влияют примесные атомы, которые находятся в междоузлиях основного материала и перемещение вакансий за счет явления диффузии.

В процессе скачка атом переходит из одного состояния в другое. При совершении скачка атом испытывает сильное отталкивание со стороны своих соседей, так что он должен преодолеть потенциальный барьер. Мигрирующий атом только время от времени приобретает достаточную энергию, чтобы "взобраться" на этот барьер. Энергия приобретается за счет локальной термической флуктуации, возникающей при одновременном столкновении атома с несколькими фононами, обладающими достаточной энергией и импульсом в нужном направлении, чтобы перебросить этот атом через барьер.

Для разработки метода, позволяющего исследовать эту ситуацию, рассмотрим одномерный аналог процесса скачка, как показано на рис. 1.

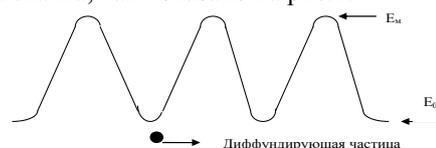


Рис. 1. Диффузия частицы в одномерном периодическом потенциале

На рисунке изображена одна частица массы  $m$ , движущаяся в одном направлении в одномерном периодическом потенциале. Частица моделирует диффундирующий атом, а периодический - есть аналог потенциала взаимодействия этого атома с остальными атомами кристалла. Равновесные положения атома соответствуют точкам минимума периодического потенциала, а разность максимальной  $E_m$  и минимальной  $E_0$  энергиями есть барьер активации. Значение  $E_m - E_0$  взято достаточно большим так что большую часть времени частица совершает малые колебания вблизи дна ямы, в соответствии с законом Гука. Когда частица за счет теплового взаимодействия со своим окружением приобретает энергию равную или большую  $E_m - E_0$  она покидает потенциальную яму и движется над барьером, занимая в конечном итоге новое равновесное положение, соседнее с первоначальным. Для того, чтобы определить как часто происходит такое движение, рассмотрим следующий механизм. Предположим, что каждый потенциальный барьер имеет достаточно плоскую вершину, так что можно определить малое, но конечное расстояние  $l$ , на протяжении которого потенциал барьера вблизи его максимума очень мало изменяется по величине. Средняя скорость определится как:

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} v \cdot e^{-mv^2/2kT} \cdot dv}{\int_0^{\infty} e^{-mv^2/2kT} \cdot dv}. \quad (15)$$

Выполнив интегрирование, получим:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{k \cdot T}{2\pi \cdot m}}. \quad (16)$$

В течении некоторого большого интервала времени  $\tau$  частица проводит большую часть времени вблизи дна потенциальной ямы, и короткое время она

находится в одной из областей длины вблизи вершин барьеров. Частота скачков определится как:

$$\Gamma = \frac{\tau(l)}{\bar{\tau} \cdot \tau}, \quad (17)$$

где  $\tau(l)$  - суммарное время ее пребывания вблизи вершин потенциальных барьеров;  $\bar{\tau}$  - среднее время, за которое частица проходит расстояние  $l$ ;  $\tau(l)/\bar{\tau}$  - полное число перескоков частицы из ямы в яму за интервал  $\tau$ .

Учитывая, что

$$\bar{v} = l / \bar{\tau} \quad (18)$$

выражение (17) приобретает вид:

$$\Gamma = \frac{\bar{v}}{l} \cdot \frac{\tau(l)}{\tau} \quad (19)$$

Полное время  $\tau$  почти равно времени  $\tau_B$ , которое частица проводит вблизи минимума потенциальной энергии, поскольку атом совершает скачки довольно редко. Используя этот факт и (16), преобразуем выражение (19) и получим:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{kT}{2\pi \cdot m}} \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{\tau(l)}{\tau_B} \quad (20)$$

Величину отношения  $\tau(l)/\tau_B$  можно оценить, используя основную аксиому статистической механики об эквивалентности усреднения по времени и усреднения по ансамблю; согласно этой аксиоме, время, которое система проводит в некоторой группе состояний, пропорционально статистической сумме этих состояний. Следовательно,

$$\frac{\tau(l)}{\tau_B} = \frac{\sum_{l} e^{-E(l)/kT}}{\sum e^{-E_B/kT}} \quad (21)$$

В числителе стоит статистическая сумма состояний, в которых частица находится вблизи дна потенциальной ямы. Интегралы по импульсам совпадают для обеих статистических сумм, так что выражение (17) имеет вид:

$$\frac{\tau(l)}{\tau_B} = \frac{\int_{x_M-l/2}^{x_M+l/2} e^{-\varphi(x)/kT} \cdot dx}{\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\varphi(x)/kT} \cdot dx}, \quad (22)$$

где  $x_M$  - координата максимума потенциальной энергии;  $\varphi(x)$  - энергия частицы, зависящая от расстояния, измеряемого от положения минимума энергии. В области  $l$  эта энергия почти не зависит от координаты, т.е.

$$\varphi(x) = E_m \quad (\text{в области } l). \quad (23)$$

Таким образом, интеграл в числителе (22) равен:

$$l \cdot e^{-E_m/kT} \quad (24)$$

В области вблизи дна потенциальной ямы при отклонении частицы от равновесного положения возникают квазиупругие силы, так что:

$$\varphi(x) = E_0 + \frac{B}{2} \cdot x^2, \quad (25)$$

где  $B$ - силовая постоянная в законе Гука.

Интеграл в знаменателе выражения (22) берется по интервалу, включающему дно потенциальной ямы и оканчивающемуся где-то в области повышения потенциала. Подставляя (15) в (22) получим,

$$e^{-E_0/kT} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-Bx^2/kT} \cdot dx = e^{-E_0/kT} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot kT}{B}} \quad (26)$$

Подставляя (24) и (26) в (22), определим:

$$\frac{\tau(l)}{\tau_B} = e^{-(E_m-E_0)/kT} \cdot l \sqrt{\frac{B}{2\pi \cdot kT}} \quad (27)$$

Объединяя выражения (27) и (20), получаем формулу, определяющую частоту скачков атома:

$$\Gamma = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B}{m}} \cdot e^{-(E_m-E_0)/kT} \quad (28)$$

Но предэкспоненциальный множитель представляет собой как раз частоту колебаний  $\nu$  частицы, находящейся вблизи дна потенциальной ямы, так что (28) выглядит так:  $\Gamma = \nu \cdot e^{-E^m/kT}$  ( $E^m$  - энергия активации миграции).

$$E^m \equiv E_m - E_0 \quad (29)$$

Физическая интерпретация выглядит таким образом: частица колеблется вблизи дна ямы с частотой  $\nu$ . Чтобы покинуть потенциальную яму, ей необходимо получить энергию равную или большую  $E^m$ , соответствующей высоте барьера. Вероятность того, что это произойдет равна экспоненциальному множителю Больцмана. Частота совершения скачков равна произведению этой вероятности на частоту колебаний.

Таким образом, рассмотренный одномерный случай иллюстрирует применение рассмотренного механизма к вычислению частоты скачков атомов по решетке, который можно применять для многомерных случаев композиций.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дугостійкий електричний контакт. Патент 6960 від 30.03.95. Кригіна Т.П., Павленко Ю.П.
- [2] Крыгина Т.П., Павленко Ю.П., Гапоненко Г.Н. Электрические контакты высокой эрозионной стойкости. Сб. науч. тр. "Низковольтные аппараты управления и защиты", Харьков, 1993.
- [3] Павленко Т.П. Анализ явлений дугового разряда. //Электротехника- Электромеханика. Сб.науч.тр. НТУ"ХПИ", №3, Харьков, 2005.

Поступила 19.09.2006

## О ВЛИЯНИИ ДОМИНИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ

Себко В.В., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. "Приборы и методы неразрушающего контроля" тел. (0572) 70-76-380, факс (0572) 70-76-602, e-mail: sebko@kpi.kharkov.ua.

*Розглянуто вплив домінуючої домішки вуглецю в сталі А-20 на значення магнітної проникності  $\mu_r$  і питомої електричної провідності  $\sigma$  циліндричного виробу, виконаного зі сталі А-20. Показано, що збільшення з 0,1% до 5,5% вуглецю приводить до зменшення  $\mu_r$  і  $\sigma$  приблизно на 40% і 31% – відповідно.*

*Рассмотрено воздействие доминирующей примеси углерода в стали А-20 на значения магнитной проницаемости  $\mu_r$  и удельной электрической проводимости  $\sigma$  цилиндрического изделия, выполненного из стали А-20. Показано, что увеличения с 0,1% до 5,5% углерода приводит к уменьшению  $\mu_r$  и  $\sigma$  примерно на 40% и 31% – соответственно.*

В работах [1-5] были предложены универсальные функции преобразования, т.е. зависимости  $K = f(x)$ , где  $K$  – комплексный параметр, определяемый по формуле

$$K = \frac{\sqrt{E_{\Sigma}^2 + E_1^2 + 2E_1 \cdot E_{\Sigma} \cdot \cos \varphi_0}}{E_0 \cdot \frac{a^2}{a_n^2} \cdot \mu_r}, \quad (1)$$

где  $E_{\Sigma}$  – суммарная ЭДС трансформаторного вихревого датчика (ТВД) с цилиндрическим изделием;  $E_1$  – ЭДС ТВД, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре между изделием и измерительной обмоткой  $W_n$  ТВД;  $\varphi_0$  – фазовый угол между  $E_{\Sigma}$  и  $E_0$ ;  $a, a_n$  – радиус изделия и измерительной обмотки ТВД;  $E_0$  – ЭДС ТВД без изделия;  $\mu_r$  – магнитная проницаемость изделия

$$E_1 = E_0 \cdot \left(1 - \frac{a^2}{a_n^2}\right) [2], \quad (5)$$

$$E_0 = 4,44 \cdot f \cdot \pi \cdot a_n^2 \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot W_n [2], \quad (6)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $H_0$  – напряженность магнитного поля вне изделия;  $f$  – частота изменения поля;  $x$  – обобщенный параметр, равный [2-5]

$$x = a \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot f}. \quad (7)$$

Известно, что с увеличением доминирующих примесей в металле его магнитная проницаемость  $\mu_r$  и удельная электропроводность  $\sigma$  уменьшается. В настоящей работе рассмотрено влияние доминирующих примесей углерода на магнитную проницаемость  $\mu_r$  и удельную электропроводность цилиндрического образца из стали А-20.

В [1-5] представлена схема ТВД, включающего в себя: 2 вольтметра, фазометр, амперметр, частотомер, генератор синусоидальных сигналов, образец, рабочий ТВД, имеющий две обмотки – намагничивающую и измерительную.

Исходные данные:  $a = 4$  мм;  $a_n = 7,1$  мм, число витков намагничивающей и измерительной обмоток равны 289 и 1050; частота измерения магнитного поля составляет 49,5 Гц (частота  $f$  поддерживается постоянной). Напряженность магнитного поля вне изделия равна  $H_0 = 50$  А/м.

В схеме измеряются значения  $E_{\Sigma}$ ,  $\varphi_0$ ,  $E_0$ ,  $E_1$  при разном процентном содержании углерода в стали.

Относительное значение магнитной проницаемости  $\mu'_r$  находят по формуле

$$\mu'_r = \frac{a_n^2 \cdot \sqrt{E_{\Sigma}^2 + E_1^2 + 2E_1 \cdot E_{\Sigma} \cdot \cos \varphi_0}}{E_0 \cdot \eta \cdot K \cdot a^2} \quad (8)$$

или

$$\mu'_r = \frac{E_2 \cdot a_n^2}{E_0 \cdot a^2 \cdot K}, \quad (9)$$

где  $E_2$  – ЭДС ТВД, связанная с магнитным потоком в образце.

Значение удельной электрической проводимости  $\sigma'$  определяют по формуле

$$\sigma' = \frac{x^2 \cdot E_0 \cdot K}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot a_n^2 \cdot f \cdot \sqrt{E_{\Sigma}^2 + E_1^2 - 2E_1 \cdot E_{\Sigma} \cdot \cos \varphi_0}} \quad (10)$$

или

$$\sigma' = \frac{x^2 \cdot E_0 \cdot K}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot a_n^2 \cdot f \cdot E_2}. \quad (11)$$

Приведем конкретный пример расчета для значений  $\mu_r$  и  $\sigma$  при содержании углерода в стали А-20  $C = 5,5\%$ , при этом  $\mu_r = 117$ , а  $\sigma = 0,53 \cdot 10^7$  См/м;  $x = 3$  (табл. 1).

Принимая во внимание, что  $f = \text{const} = 49,5$  Гц, найдем из (7) значение обобщенного параметра  $x$

$$x = (4 \cdot 10^{-3}) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 117 \cdot 0,53 \cdot 10^7 \cdot 49,5} = 1,97.$$

Далее по формуле (6) вычисляем ЭДС вторичной обмотки ТВД без образца

$$E_0 = 4,44 \cdot 49,5 \cdot \pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 1050 = 2,298 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Затем найдем значения коэффициента заполнения магнитным полем изделия  $\eta$  по формуле

$$\eta = \frac{a^2}{a_n^2} = \frac{(4 \cdot 10^{-3})^2}{(7,1 \cdot 10^{-3})^2} = 0,312. \quad (12)$$

Из (5) определим значение ЭДС  $E_1$

$$E_1 = 2,298 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - \frac{(4 \cdot 10^{-3})^2}{(7,1 \cdot 10^{-3})^2}\right) = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Найдем ЭДС ТВД  $E_2$

$$E_2 = K \cdot \frac{a^2}{a_n^2} \cdot E_0 \cdot \mu_r; \quad (13)$$

$$E_2 = 0,853891 \cdot 0,312 \cdot 2,298 \cdot 10^{-3} \cdot 117 = 72,87 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Значение  $K$  найдем из табл. 1.

Далее по формуле определим суммарную ЭДС  $E_{\Sigma}$ :

$$E_{\Sigma} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \cdot \cos\varphi} \quad [2-5], \quad (14)$$

где  $\varphi$  – фазовый угол параметра  $K$  (табл. 1).

$$E_{\Sigma} = \sqrt{(1,57 \cdot 10^{-3})^2 + (72,87 \cdot 10^{-3})^2} + 2 \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} \times \\ \times 72,87 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(23,52) = 74,31 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Величину  $\varphi$  найдем из табл. 1. Рассчитаем  $\text{tg}\varphi_0$  и  $\varphi_0$ :

$$\text{tg}\varphi_0 = \frac{E_{\Sigma} \cdot \sin\varphi}{E_{\Sigma} \cdot \cos\varphi + E_0 \left(1 - \frac{a^2}{a_n^2}\right)}; \quad (15)$$

$$\text{tg}\varphi_0 = \frac{74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(23,52)}{74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(23,52) + 1,57 \cdot 10^{-3}} = 0,208154;$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{E_{\Sigma} \cdot \sin\varphi}{E_{\Sigma} \cdot \cos\varphi + E_0 \left(1 - \frac{a^2}{a_n^2}\right)}; \quad (16)$$

$$\varphi_0 = \arctg \left( \frac{74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(23,52)}{74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(23,52) + 1,57 \cdot 10^{-3}} \right) = 11,76 \text{ град.}$$

Значения  $E_{\Sigma}$ ,  $\varphi_0$ ,  $E_0$ ,  $f$  нам известны,  $a_n$ ,  $a$ ,  $H_0$ ,  $\eta$ ,  $W$  – даны, найдем значения  $\mu_r$  и  $\sigma'$

Найдем ЭДС  $E_2$  из формулы (14)

$$E_2 = \sqrt{E_{\Sigma}^2 + E_1^2 - 2E_1 \cdot E_{\Sigma} \cdot \cos\varphi_0}. \quad (17)$$

$$E_2 = \sqrt{(74,31 \cdot 10^{-3})^2 + (1,57 \cdot 10^{-3})^2} + \\ + 2 \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot 74,31 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(11,76) = 72,78 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Значения  $\mu_r$  и  $\sigma'$  находим по формулам (8) – (11)

$$\mu_r = \frac{72,78 \cdot 10^{-3}}{2,298 \cdot 10^{-3} \cdot 0,312 \cdot 0,853891} = 116,85;$$

$$\sigma' = \frac{3^2 \cdot 2,298 \cdot 10^{-3} \cdot 0,312}{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 49,52} \times \\ \times \frac{0,853891}{72,78 \cdot 10^{-3}} = 0,531 \cdot 10^7 \text{ См/м.}$$

В таблице приведены значения  $\mu_r$  и  $\sigma$  в зависимости от содержания углерода в стали.

Таблица 1

$W_n = 1050$  витков;  $a = 4 \cdot 10^{-3}$  м;  $a_n = 7,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $H_0 = 50$  А/м;  
 $f = 49,5$  Гц;  $E_0 = 2,298 \cdot 10^{-3}$  В;  $E_1 = 1,57 \cdot 10^{-3}$  В;

$$\eta = a^2 / a_n^2 = 0,312$$

$C, \%$	$\mu_r$	$\sigma \cdot 10^7$ См/м	$x$	$\varphi, \text{град}$
0,1	197	0,73	3	35,80
0,5	192	0,715	2,93	35,32
1	186	0,7	2,85	34,72
1,5	180	0,695	2,80	34,30
2	174	0,685	2,73	33,68
2,5	168	0,67	2,65	32,91
3	160	0,65	2,55	31,84
3,5	152	0,63	2,45	30,66
4	143	0,605	2,33	29,09
4,5	133	0,58	2,20	27,22
5	125	0,55	2,07	25,18
5,5	117	0,53	1,97	23,52

Продолжение табл. 1

$K$	$E_2 \cdot 10^{-3}, \text{В}$	$\varphi_0, \text{град}$	$E_{\Sigma} \cdot 10^{-3}, \text{В}$
0,615292	89,69	17,90	88,41
0,629659	89,46	17,66	88,18
0,646662	89,03	17,36	87,73
0,657592	87,64	17,15	86,34
0,673261	86,76	16,84	85,45
0,691648	86,08	16,45	84,75
0,71524	84,81	15,92	83,47
0,739337	83,32	15,33	81,97
0,768602	81,54	14,55	80,17
0,800221	79,03	13,61	77,63
0,831096	77,20	12,59	75,78
0,853891	74,31	11,76	72,87

Продолжение табл. 1

$E_2 \cdot 10^{-3}, \text{В}$	$\mu_r$	$\sigma', \text{См/м}$	$\gamma_{\mu}$	$\gamma_{\sigma}$
88,20	196,52	0,732	0,243	0,243
87,97	191,55	0,717	0,237	0,237
87,53	185,57	0,702	0,230	0,230
86,14	179,59	0,697	0,229	0,229
85,26	173,61	0,687	0,223	0,223
84,57	167,64	0,671	0,215	0,215
83,30	159,67	0,651	0,205	0,205
81,81	151,71	0,631	0,193	0,193
80,03	142,74	0,606	0,178	0,178
77,50	132,78	0,581	0,162	0,162
75,67	124,82	0,551	0,142	0,142
72,78	116,85	0,531	0,129	0,129

Из таблицы следует, что с ростом содержания углерода в стали А-20 значения  $\mu_r$  и  $\sigma$  падает примерно на 40% и 30% соответственно. В таблице приведены численные значения  $\mu_r$  и  $\sigma$ , которые найдены контрольными методами ( $\mu_r$  – баллистическим методом;  $\sigma$  – мостовым, на постоянном токе). Численные значения относительных погрешностей определяют по формуле с учетом [6]

$$|\gamma_{\mu}| = \frac{\mu_r' - \mu_r}{\mu_r} \cdot 100\% = \frac{116,85 - 117}{117} \cdot 100\% = 0,129\%; \quad (18)$$

$$|\gamma_{\sigma}| = \frac{\sigma' - \sigma}{\sigma} \cdot 100\% = \frac{0,531 \cdot 10^7 - 0,53 \cdot 10^7}{0,531 \cdot 10^7} \cdot 100\% = 0,129\%. \quad (19)$$

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Баштаников Л.А., Себко В.П., Тюпа В.И. Определение магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости материала трубчатых изделий. – Дефектоскопия, 1985, № 5, с.57-63.
- [2] Себко В.П., Сиренко Н.Н. Трехпараметровый контроль цилиндрических изделий. – Дефектоскопия, 1991, № 7, с.36-42.
- [3] Себко В.П., Хоменко В.Г. К расчету компонентов сигналов электромагнитного преобразователя с трубчатым проводящим изделием. Вестник харьковского государственного политехнического университета. Вып.92. – Харьков:ХГПУ, 200. – С. 76-80.
- [4] Себко В.П., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш. Расчет ожидаемых сигналов параметрического электромагнитного преобразователя с проводящим изделием. Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Вып. 10. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – С. 407-409.
- [5] Себко В.П., Горкунов Б.М., Ду Хуан Янг. К расчету ожидаемых значений компонентов сигналов многопараметрового электромагнитного преобразователя. Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Вып. 9. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – С. 115-118.
- [6] Алукер Ш.М. Электрические измерения. Москва, Изд-во "Колос", 1972.- 347 с.

Надійшла 21.03.2006

## РАСЧЕТ ОЖИДАЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ СИГНАЛОВ ТРЕХПАРАМЕТРОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Себко В.П., д.т.н., проф., Филоненко Д.В., Ноздрачева Е.Л.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. "Приборы и методы неразрушающего контроля"  
тел. (0572) 70-76-380, факс (0572) 70-76-602, e-mail: sebko@kpi.kharkov.ua.

*Проведено розрахунок двухчастотного контактного электромагнитного преобразователя на основе использования экстремума похідної нормованої внутрішньої індуктивності прямолинійного стержня. Запропоновано алгоритм спільного визначення двох значень опорів і індуктивностей, що відповідають частотам зміни магнітного струму при екстремумі й будь-якій іншій частоті.*

*Проведен расчет двухчастотного контактного электромагнитного преобразователя на основе использования экстремума производной нормированной внутренней индуктивности прямолинейного стержня. Предложен алгоритм совместного определения двух значений сопротивлений и индуктивностей, соответствующих частотам изменения магнитного тока при экстремуме и любой другой частоте.*

Рассмотрена методика расчета ожидаемых значений сигналов контактного двухчастотного электромагнитного преобразователя на основе использования экстремума чувствительности нормированной внутренней индуктивности  $L_{in}$  т.е.  $dL_{in}/dx$  (где  $dL_{in}$  – дифференциал  $L_{in}$ ,  $dx$  – дифференциал обобщенного параметра  $x$  [1, 2])

$$x = a \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot f}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $a$  – радиус изделия,  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость,  $\sigma$  – удельная электропроводность;  $f$  – частота тока.

График зависимостей нормированных сопротивлений  $R_n$  и индуктивности  $L_{in}$  от  $x$  приведены в [1] (рис. 1, 2).

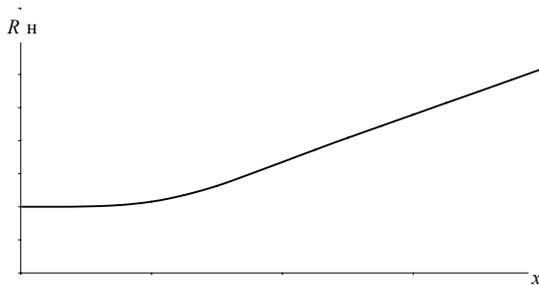


Рис. 1. Зависимость  $R_n$  от  $x$

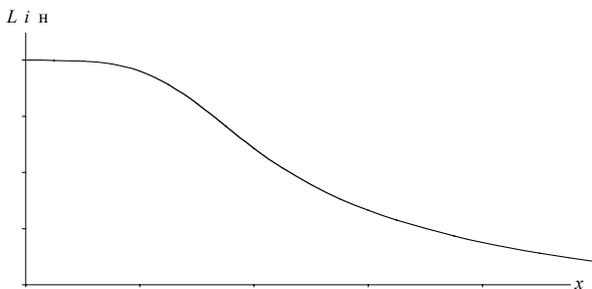


Рис. 2. Зависимость  $L_{in}$  от  $x$

График зависимости  $dL_{in}/dx$  от  $x$ , где это производные  $L_{in}$  по  $x$  (рис. 3). Из этого рисунка видно, что

максимум кривой наступает при  $x = 3,44$ , а второе значение  $x$  возьмем равное 6.

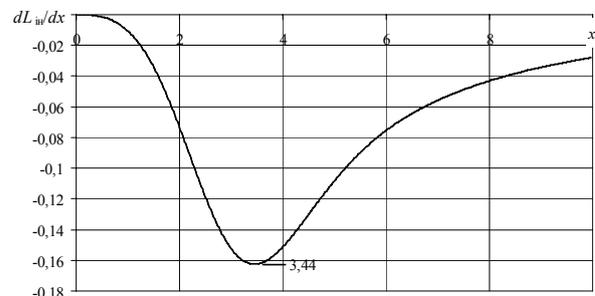


Рис. 3. График зависимости  $dL_{in}/dx$  от  $x$

По зависимостям рис. 1 и 2 найдем для  $x_1 = 3,44$  и  $x_2 = 6$  значения  $R_{1n}$ ,  $R_{2n}$  и  $L_{1in}$ ,  $L_{2in}$ . Значение сопротивления  $R$  найдем по формуле

$$R = R_0 \cdot R_n, \quad (2)$$

где  $R_0$  – сопротивление стержня постоянному току, равное

$$R_0 = \frac{l}{\sigma \cdot S}, \quad (3)$$

где  $l$ ,  $S$  – длина и площадь поперечного сечения стержня

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (4)$$

Тогда из (2) и (3) найдем сопротивление стержня для  $x_1 = 3,44$  и  $x_2 = 6$ , т.е.  $R_1$ ,  $R_2$ .

Значение внутренней индуктивности найдем из соотношения

$$L_i = L_{in} \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l}{8 \cdot \pi}. \quad (5)$$

Таким образом найдем  $L_{i1}$ ,  $L_{i2}$  при каждом  $x_1 = 3,44$  и  $x_2 = 6$ . После этого находим полные индуктивности стержня из суммы  $L_i$  и  $L_e$  (где  $L_e$  – внешняя индуктивность [3])

$$L_e = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \ln \frac{2l}{a} - 1 + \frac{4a}{\pi \cdot l} - \frac{a^2}{l^2} \right), \quad (6)$$

тогда

$$L = L_i + L_e. \quad (7)$$

Из (6) и (7) найдем  $L_1, L_2$ . Далее находим частоты  $f_1$  и  $f_2$  при  $x_1 = 3,44$  и  $x_2 = 6$  из формулы (1). При этом

$$f = \frac{x^2}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot a^2}. \quad (8)$$

Приведем конкретный пример расчета. По известным данным цилиндрического изделия (табл. 1) таким как радиус  $a$ , длина  $l$ , относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$ , удельная электропроводность  $\sigma$  рассчитываем ожидаемые значения компонентов сигналов преобразователя, решим так называемую прямую задачу.

Таблица 1

Исходные данные

$x$	$R_n$	$L_n$	$a$ , мм
3,44	1,47052902	0,77508871	2,5
6	2,39393846	0,46512986	

Продолжение табл.1

$l$ , м	$\mu_r$	$\sigma \cdot 10^7$ , См/м	Материал изделия
0,5	136	0,61	A-20

Из (4) определим площадь поперечного сечения  $S$

$$S = \frac{\pi \cdot (2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,196 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 0,196 \text{ мм}^2.$$

Из (3) найдем  $R_0$

$$R_0 = \frac{1}{0,61 \cdot 10^7} \cdot \frac{l}{0,196 \cdot 10^{-6}} = 0,004117 \text{ Ом}.$$

Значения сопротивлений  $R_1, R_2$  найдем по формуле (2) при каждом  $x_1 = 3,44$  и  $x_2 = 6$

$$R_1 = 0,004117 \cdot 1,47052902 = 0,0061 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 0,004117 \cdot 2,39393846 = 0,01 \text{ Ом}.$$

Внутренние индуктивности  $L_{i1}, L_{i2}$  найдем из соотношения (5)

$$L_{i1} = 0,77508871 \cdot 136 \cdot 0,025 \cdot 10^{-6} = 2,64 \cdot 10^{-6} \text{ Гн};$$

$$L_{i2} = 0,46512986 \cdot 136 \cdot 0,025 \cdot 10^{-6} = 1,58 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Внешняя индуктивность  $L_e$  рассчитаем по формуле (6)

$$L_e = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,5}{2 \cdot \pi} \left( \ln \frac{2 \cdot 0,5}{2,5 \cdot 10^{-3}} - 1 + \frac{4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^2}{\pi \cdot 0,5 \cdot 0,5^2} \right) = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Полную индуктивность находим из (7)

$$L_1 = 2,64 \cdot 10^{-6} + 0,5 \cdot 10^{-6} = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ Гн};$$

$$L_2 = 1,58 \cdot 10^{-6} + 0,5 \cdot 10^{-6} = 2,08 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Исходя из этой формулы (8), найдем частоту  $f$  для каждого  $x$ :

$$f_1 = \frac{3,44^2}{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 136 \cdot 0,61 \cdot 10^7 \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^2} = 289,05 \text{ Гц}.$$

$$f_2 = \frac{6^2}{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 136 \cdot 0,61 \cdot 10^7 \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^2} = 879,36 \text{ Гц}.$$

Все рассчитанные значения сводим в табл. 2.

Таблица 2

Рассчитанные значения ожидаемых компонентов сигналов преобразователя

	$R_n$	$L_n$	$f$ , Гц	$S$ , $\text{м}^2 \cdot 10^{-5}$
$x_1$	1,47052902	0,77508871	289,05	1,96
$x_2$	2,39393846	0,46512986	879,36	

Продолжение табл.2

	$R_0$ , Ом	$R_2$ , Ом	$L_0$ , $\text{Гн} \cdot 10^{-6}$	$L_{e2}$ , $\text{Гн} \cdot 10^{-6}$
$x_1$	0,00417	0,0061	0,025	0,5
$x_2$		0,01		

Продолжение табл.2

	$L_{i1}$ , $\text{Гн} \cdot 10^{-6}$	$L$ , $\text{Гн} \cdot 10^{-6}$
$x_1$	2,64	3,14
$x_2$	1,58	2,08

Таким образом, проведен расчет двухчастотного контактного электромагнитного преобразователя на основе использования экстремума производной нормированной внутренней индуктивности прямолинейного стержня. Предложен алгоритм совместного определения двух значений сопротивлений и индуктивностей, соответствующих частотам изменения магнитного тока при экстремуме и любой другой частоте.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Себко В.П., Львов С.Г. Расчет магнитной проницаемости удельной электрической проводимости цилиндрических изделий по сигналам контактного электромагнитного преобразователя. Технічна електродинаміка. – 1998, – Вып. 2. – Т. 2. – С. 171-174.
- [2] Себко В.В. Контактный электромагнитный метод определения магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и температуры цилиндрического изделия // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2002. – Вып. 7. – С. 152–157.
- [3] Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей // Л.: Энергоатомиздат. – 1986, – 488 с.

Поступила 10.03.2006

## ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕШЕЙКОВ НА ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Фомин В.И., к.т.н., доц.,  
 Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
 тел. (057) 707-62-81, e-mail: fvi@kpi.kharkov.ua

*У статті проведено аналіз впливу кількості послідовних перешейків плавкого елемента, зробленого з срібла, на захисні характеристики швидкодіючих плавких запобіжників.*

*В статтє проведено аналіз впливня числа послєдовательных перешейков плавкого елемента, выполненного из серебра, на защитные характеристики быстродействующих плавких предохранителей.*

В настоящее время для защиты электроприводов, управляемых силовыми полупроводниковыми преобразователями, используются автоматические воздушные выключатели и плавкие предохранители. Быстродействующие предохранители предназначены только для защиты от внутренних коротких замыканий. Сложность процессов аварийных режимов, имеющая место в преобразователях приводов (пробой полупроводникового прибора, опрокидывание инвертора и т.п.), связанная с большим числом факторов, определяющих их характер (начальная фаза внутреннего короткого замыкания, параметры короткозамкнутого контура и т.п.) не дает возможности полного экспериментального исследования оптимальных способов защиты на опытных образцах преобразователей.

Более рациональным для этого является исследование аварийных режимов и изучение оптимальных способов защиты на математических моделях с помощью ЭВМ.

Известно, что параметры плавкого элемента являются важнейшими факторами, определяющими основные характеристики быстродействующих плавких предохранителей. От их величины зависит работа преобразователя в номинальном режиме и защитные характеристики при отключении токов короткого замыкания.

Целью данной работы является исследование влияния числа последовательных перешейков на защитные характеристики быстродействующих плавких предохранителей, а следовательно и на работу полупроводниковых преобразователей в режиме короткого замыкания.

Испытания плавких предохранителей показали [1], что при относительно больших токах короткого замыкания все последовательные узкие перешейки равного поперечного сечения расплавились одновременно. При одних и тех же параметрах цепи и при одном и том же токе, при котором происходит расплавление узкого перешейка, длительность горения дуги с одним последовательным перешейком больше, чем в случае нескольких последовательно соединенных перешейков и приводит к значительному уменьшению интегралов тока дуги. Это является причиной более высоких значений  $dl/dt$  и  $dU_d/dt$ , поэтому дуга гасится более эффективно.

Однако плавкий элемент с большим числом последовательных перешейков  $n$  имеет недостаток: увеличивается его сопротивление, что приводит к необходимости увеличения сечения плавкого элемента (числа параллельных перешейков  $m$ ) чтобы иметь на выводах плавкого предохранителя одинаковое пре-

вышение температуры при протекании одного и того же номинального тока  $I_n$ . Как результат увеличивается преддуговое время, что может отрицательно сказаться на защитных характеристиках. Кроме того, число последовательных перешейков  $n$  увеличивает напряжение на предохранителе и достижение которого сверх допустимого значения может привести к внутреннему короткому замыканию в преобразователе. Поэтому существует оптимальное  $n$  для данного предохранителя при определенном номинальном напряжении  $U_n$ . В литературных источниках приводятся противоречивые рекомендации по выбору напряжения на один последовательный перешеек.

Как правило, все фирмы выпускают быстродействующие предохранители, плавкие элементы которых изготавливаются из серебра Sr. 999. Большинство всех применяемых форм перешейков можно получить из формы трапеции и круглого выреза. Исследованию подвергались плавкие элементы с перешейками, образованными круглыми вырезами.

Исследовались быстродействующие плавкие предохранители на номинальный ток 630 А, номинальное напряжение 660 В. Плавкие элементы имели следующие параметры:

$\delta$  – толщина плавкого элемента 0,01 см;  $b_0$  – ширина перешейка 0,015 см;  $\varnothing$  – диаметр отверстия выреза перешейка 0,15 см;  $B$  – ширина ветви 0,165 см;  $l$  – длина плавкого элемента 4,2 см;  $n$  – число последовательных перешейков 2; 3; 4; 5 и 6.

На рис. 1 представлена ветвь плавкого элемента с  $n = 3$ .

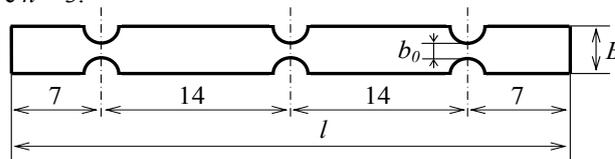


Рис. 1

По методике, представленной в [2], были проведены расчеты числа параллельных ветвей  $m$  для всех плавких элементов с различными  $n$  (сечения плавких элементов), исходя из заданного превышения температуры  $90^\circ\text{C}$  на выводах предохранителя. Для этого токоведущая система предохранителя (плавкий элемент, выводы и токоподводящие проводники) разбивается на ряд участков прямоугольной формы и постоянного сечения (рис. 2). Рабочая часть плавкого элемента разбивается на участки, каждый из которых представляет собой модуль плавкого элемента, причем в пределах каждого участка сечение и периметр одинаковы и равны эквивалентным значениям сечения и периметра модуля плавкого элемента.

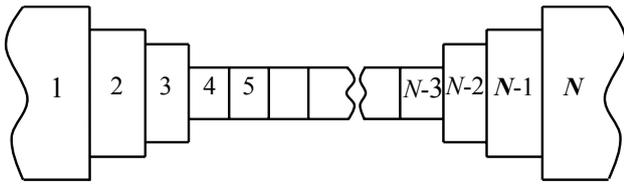


Рис. 2

- 1 и N – внешние проводники, подсоединяемые к предохранителю;  
 2 и N-1 – выводы предохранителя;  
 3 и N-2 – нерабочие части плавкого элемента;  
 4, 5, ... и N-3 – рабочие части плавкого элемента (модули переменной ширины) число которых зависит от числа последовательных перешейков n.

Для определения эквивалентных значений периметра и сечения модулей рабочей части плавкого элемента была использована методика, представленная в [2].

Результаты числа параллельных перешейков m для плавких элементов с различным числом последовательных перешейков n представлены в табл. 1.

Дуговой процесс в кварцевом наполнителе отличается от процесса горения дуги в других средах. В дисперсной среде дуговой столб расширяется, проникая через поры в пространственной решетке, образованной частицами дисперсного вещества. В такой решетке или "скелете" рекомбинация ионов значительно ускоряется.

Если патрон предохранителя осторожно, без заметных вибраций заполнить кварцевым песком, то объемная плотность такого заполнения приблизительно равна 1,4 г/см<sup>3</sup>. Дальнейшее уплотнение можно достичь при помощи вибраций или непосредственного механического нажима. При этом объемная плотность асимптотически приближается к пределу, который называется "нормальным уплотнением". Численное значение объемной плотности при нормальном уплотнении зависит от размера зерна. Для фракции песка со средним диаметром зерна в пределах 0,2-1,0 мм это значение равно 1,6±0,05 г/см<sup>3</sup>.

Натурные испытания быстродействующих плавких предохранителей при различных параметрах контура короткого замыкания на переменном токе частотой 50 Гц были заменены расчетами на ЭВМ.

Расчет процесса коммутации тока короткого замыкания проводился по методике, представленной в [2]. Параметры контура короткого замыкания были следующими:

- а)  $I_{к.з.} = 10 \text{ кА}; U_c = 730 \text{ В}; \cos \varphi = 0,2; \psi = 1,0;$   
 б)  $I_{к.з.} = 100 \text{ кА}; U_c = 730 \text{ В}; \cos \varphi = 0,1; \psi = 1,5,$

где  $I_{к.з.}$  - действующее значение тока к.з.;  $U_c$  - действующее значение напряжения источника питания;  $\cos \varphi$  - коэффициент мощности контура;  $\psi$  - начальная фаза включения.

Ниже приведены результаты проведенных испытаний.

Таблица 1

n	m	$I_{к.з.}$	$t_{пл}$	$\int_{пл} \cdot 10^{-3}$	$I_{пл}$	$I_{огр}$	$t_{откл}$	$\int_{д} \cdot 10^{-3}$	$\int_{откл} \cdot 10^{-3}$	$U_{max}$	$\int_{к.э.д}$	$l_{выг}$	$B_{\Sigma}$	M
2	54	10	2,13	52,65	8,63	12,11	6,58	400	453	1729	0,728	1,010	8,91	5,17
		100	0,44	55,90	19,49	32,59	2,15	930	986	1995	0,662	0,827		
3	61	10	2,30	66,33	9,30	11,76	6,54	369	435	1714	0,604	0,680	10,06	5,83
		100	0,48	72,50	21,24	29,93	2,16	819	891	1880	0,548	0,559		
4	68	10	2,48	83,08	9,99	11,60	6,58	353	436	1674	0,520	0,501	11,22	6,51
		100	0,51	86,90	22,56	27,76	2,19	749	836	1772	0,473	0,416		
5	76	10	2,67	103,43	10,70	11,60	6,64	347	450	1614	0,454	0,386	12,54	7,23
		100	0,55	108,87	24,30	25,59	2,25	711	820	1671	0,415	0,325		
6	84	10	2,86	126,62	11,39	11,83	6,79	344	470	1558	0,403	0,308	13,86	8,04
		100	0,59	134,23	26,05	26,62	2,31	682	816	1585	0,368	0,263		

n – число последовательных перешейков; m – число параллельных перешейков;  $I_{к.з.}$  – эффективное значение тока короткого замыкания, кА;  $t_{пл}$  – время протекания тока к.з. до образования электрической дуги, мс;  $\int_{пл}$  – джоулев интеграл плавления (преддуговой), А<sup>2</sup>·с;  $I_{пл}$  – ток в цепи на момент образования электрической дуги, кА;  $I_{огр}$  – максимальный пропускаемый ток (ток ограничения), кА;  $t_{откл}$  – полное время отключения цепи от момента начала к.з., мс;  $\int_{д}$  – дуговой джоулев интеграл, А<sup>2</sup>·с;  $\int_{откл}$  – полный джоулев интеграл отключения, А<sup>2</sup>·с;  $U_{max}$  – максимальное напряжение на предохранителе, В;  $\int_{к.э.д}$  – количество электричества i-t, протекающее по единичной дуге за время ее горения, А·с;  $l_{выг}$  – длина выгорания, см;  $B_{\Sigma}$  – ширина плавкого элемента, см; M – масса серебра, идущего на изготовление плавкого элемента, г.

Из проведенных расчетов можно сделать следующие выводы. С увеличением числа последовательных перешейков увеличивается преддуговое время, ток плавления и интеграл плавления. Это объясняется тем, что предохранители с большим n имеют большее суммарное сечение перешейков.

Увеличивается также ширина плавкого элемента,

а следовательно, и масса серебра, идущего на его изготовление. Увеличивается суммарная эрозия плавкого элемента под воздействием электрической дуги, что является причиной более высоких значений  $dl/dt$  и  $dU_{д}/dt$ . Практически не изменяется полное время отключения.

Дуговой интеграл и полный джоулев интеграл отключения имеют явный минимум при определенном значении n. Максимальное напряжение на предохранителе уменьшается. Отсюда следует вывод, что для предохранителя на определенное значение номинального напряжения  $U_n$  существует оптимальное значение числа последовательных перешейков, для которых основные защитные характеристики будут наилучшими.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пастор Ю.А. Теплообмен и гашение электрической дуги в плавких предохранителях с дисперсным и жидкостным наполнителем. – Дис. канд. техн. наук. – Рига, 1977. – 205 с.  
 [2] Фомин В.И. Определение тепловых и коммутационных характеристик быстродействующих предохранителей на стадии проектирования. – Дис. канд. техн. наук. – Харьков, 1983. – 204 с.

Поступила 4.01.2006

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ АТОМА БОРА

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

*З позицій класичної та квантової електродинаміки на основі теорії атому Бора надані результати теоретичних досліджень мікроелектромеханічних процесів усередині найпростішого атому речовини – атому водню, які дозволяють по-новому глянути на електрофізичний механізм внутрішньоатомних квантових явищ в речовині.*

*С позицій класической и квантовой электродинамики на основе теории атома Бора приведены результаты теоретических исследований микроэлектромеханических процессов внутри простейшего атома вещества – атома водорода, позволяющие по-новому взглянуть на электрофизический механизм внутриатомных квантовых явлений в веществе.*

### ВВЕДЕНИЕ

Строение атома вещества является одной из тех важнейших фундаментальных характеристик, знание которых крайне необходимо как для понимания его (вещества) особенностей и многообразных свойств и протекающих в нем физико-химических процессов, так и для практического решения широкого круга прикладных задач. Одной из таких задач электрофизической направленности, по мнению автора, является, в частности, определение картин сверхсильных электрических и магнитных полей в разнообразных атомах и молекулах газообразных, жидких и твердых материалов. Знание указанных картин электромагнитного поля микромира и соответственно умение их рассчитывать открывает перед человечеством определенные перспективы в области нанотехнологий при синтезе и получении новых материалов с заданными механическими и электрофизическими свойствами. Поэтому данному вопросу во всем мире уделялось ранее и уделяется в настоящее время исключительно большое внимание. Современные результаты экспериментальных исследований по электричеству и магнетизму свидетельствуют о том, что протекание как макроскопических, так и микроскопических электромагнитных взаимодействий и явлений в твердом теле или ином физическом объекте обычно описывается теми параметрами (например, электрическим зарядом вещества, энергией частицы или волны вещества и др.), которые носят дискретный (квантовый) характер и адекватно отражают внутреннюю природу исследуемых электрофизических процессов [1, 2].

Известно, что в нынешних условиях прогресс в области электротехники (электродинамики) и электротехнологий определяется, в основном, новейшими достижениями в тех научно-технических сферах, которые охватывают полный цикл проведения необходимых для этого комплексных научно-технических работ: изучение на атомно-молекулярном уровне, синтез, технологическое получение в требуемых объемах и практическое использование новых суперматериалов с наперед заданными предельными физико-механическими и электрофизическими характеристиками.

В тоже время в последние годы у определенной части специалистов как электротехнического, так и электрофизического направления имеется неудовлетворенность тем, что "...электротехническая наука в

известной мере оторвалась от современной физики, ее важнейших разделов – квантовой механики и квантовой электродинамики" [1]. Очевидно, что указанные разделы физической науки о микромире являются основой любого современного научного знания, в том числе и из электротехнической (электродинамической) области. В этой связи, на мой взгляд, полезным как с общефизической, так и методической точки зрения для указанных специалистов может оказаться обращение к исследованию с нетрадиционных электродинамических позиций микроэлектромеханических процессов, протекающих в атоме любого вещества. Для этой цели нам вначале следует хоть вкратце остановиться на его (атоме) основных известных физико-математических моделях, их главных достоинствах и недостатках.

### 1. ОСНОВНЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ АТОМА ВЕЩЕСТВА

Благодаря неопровержимым результатам экспериментальных исследований в области атомной физики, в частности, данным по прохождению положительно заряженных  $\alpha$ -частиц (ядер атома гелия) через металлические пластинки при  $m=2$  и  $n=1$  и открытию атомного ядра, полученным известным английским физиком Эрнстом Резерфордом и его учениками, научному миру в 1913 году была в окончательном виде предложена планетарная модель атома вещества, содержащего в своем центре положительно заряженное ядро, вокруг которого по круговым орбитам, подобно планетам солнечной системы, вращались отрицательно заряженные элементарные частицы – электроны [3, 4]. Основным недостатком планетарной модели атома Резерфорда было то, что электрон, движущийся в атомной оболочке с постоянным центростремительным ускорением в соответствии с законами классической электродинамики, как и любой другой перемещающийся с ускорением электрический заряд, должен был излучать электромагнитную энергию. А раз так, то подобная атомная микросистема должна была быть энергетически неустойчивой и быстро распадающейся, что противоречило внутриатомным явлениям, наблюдаемым физиками-ядерщиками в действительности.

В том же 1913 году великий датский физик Нильс Бор положил начало нового научного направления в атомной физике – квантовой механике и появлению квантовой модели атома вещества [4]. Предложенная им новая планетарная модель атома базировалась на так называемых постулатах Бора, то есть на аксиоме целочисленности внутриатомных процессов или на целочисленной точке зрения теории дискретных квантов (от лат. *quantum* – количество, порция) действия Планка. При этом для большей ясности подчеркнем сущность основной идеи немецкого физика Макса Планка: он теоретически показал, что испускание (поглощение) твердым телом (веществом) теплового излучения происходит не непрерывным образом, как ранее предполагалось в классической физике, а в виде отдельных порций или квантов энергии  $E_k$ , равных произведению их частоты  $\nu$  на некоторую постоянную  $h$ , впоследствии названную постоянной Планка ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с [5]).

Развивая эту идею, Н. Бор выдвинул гипотезу о том, что прерывному характеру испускания (поглощения) атомами квантов энергии должен соответствовать скачкообразный характер перехода атомов из одного энергетического состояния в другое. Согласно этой гипотезе Н. Бор предположил, что любой атом может находиться в дискретном ряде стационарных состояний, не сопровождающихся электромагнитным излучением. Переход же атома из нормального в возбужденное состояние, по его мнению, может происходить только путем поглощения кванта света (фотона) соответствующей величины и перехода его электрона с близлежащей к ядру стационарной круговой орбиты на удаленную от него, а из возбужденного состояния в нормальное – путем испускания подобного кванта энергии и перехода соответствующего электрона с удаленной на близлежащую к ядру стационарную круговую орбиту [5].

В соответствии с теоретическими работами Н. Бора о строении атома вещества следовало, что атом поглощает и излучает электромагнитную энергию квантами. Квантовые идеи Н. Бора получили свое экспериментальное подтверждение в знаменитых опытах Франка – Герца от 1914 года по обнаружению дискретных возбужденных состояний для ряда атомов и определению энергии их ионизации  $E_0$  [4, 5]. Результаты этих экспериментов немецких физиков Джеймса Франка и Густава Герца прямо показали, что энергия атомов изменяется дискретно. Как ими было установлено, например, для атомов ртути поглощаемая порция (квант) энергии для их возбуждения и испускаемая потом электромагнитная энергия при обратном переходе атома ртути из возбужденного состояния в основное составляет примерно  $E_k = 4,9\text{эВ}$  ( $7,85 \cdot 10^{-19}$  Дж), что соответствует энергии кванта ультрафиолетового света длиной волны в 253,6 нм [5]. С помощью предложенной Н. Бором квантовой модели атома можно было определять орбитальную скорость электронов, радиус их орбиты, а также энергию и частоту квантов излучения. Данная модель хорошо себя зарекомендовала при описании внутриатомных

явлений для простейшего из атомов – атома водорода, вокруг ядра которого по практически круговой орбите движется единственный электрон. Теория атома Бора позволила правильно описать экспериментально наблюдаемые длины волн (частоты) для известных линейчатых спектров атома водорода (серия Лаймана, Бальмера, Пашена, Брекета и Пфунда) [5, 6]. Однако, атомная теория Бора в своем первоначальном виде не смогла объяснить многие другие экспериментальные данные атомной физики (например, расщепление спектральных линий атомов в сильном электрическом поле – эффект Штарка или в сильном магнитном поле – эффект Зеемана и др.) [5].

В 1915 году известный немецкий физик Арнольд Зоммерфельд, развивая теорию атома Бора, в атомную физику ввел идею пространственного квантования [5]. Он предположил, что движение электронов в атоме происходит не только по круговым, но и по эллиптическим орбитам. Для этого им дополнительно к главному квантовому числу  $n = 1, 2, 3, \dots$ , соответствующему номеру периода атома в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева или порядковому номеру круговой орбиты электрона и полностью определяющему энергию электронов в атоме, было введено орбитальное квантовое число  $l = n - 1$ , характеризующее форму орбиты электрона в атомной оболочке. Для характеристики электромагнитных свойств электрона в атоме вещества в 1925 году А. Зоммерфельдом было дополнительно введено третье квантовое число – магнитное квантовое число  $m_l = \pm l$ , характеризующее ориентацию плоскости электронной орбиты в трехмерном "евклидовом" пространстве [6]. Атомная теория Бора – Зоммерфельда давала правильное описание энергетических уровней для водородоподобных атомов, то есть атомов с одним электроном (например, для атома водорода, однократно ионизованного атома гелия и других атомов) [5].

Для полноты рассматриваемого нами вопроса отметим, что к 1926 году австрийским физиком Вольфгангом Паули и американскими физиками Джорджем Уленбеком и Сэмюэлем Гаудсмитом были разработаны два фундаментальных понятия атомной физики [4]: принцип запрета Паули (каждое энергетическое состояние в атоме может быть занято только одним электроном) и спин электрона (вращение электрона вокруг собственной оси). Введение в атомную физику понятия спина электрона (от англ. *spin* – *вертено*) потребовало введения в квантовую механику четвертого квантового числа – спинового квантового числа  $m_s = \pm 1/2$  (положительное значение  $m_s$  соответствует одинаковому направлению собственного и орбитального вращения электрона, а отрицательное – противоположному их направлению вращения [5]). Получалось, что в соответствии с принципом запрета Паули в атоме любого вещества в его атомной оболочке может существовать только один электрон в энергетическом состоянии, характеризуемом данными и соответствующими для него значениями четырех квантовых чисел  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  и  $m_s$ .

Несмотря на все это, усовершенствованная квантовая модель атома Бора была не в состоянии правильно объяснить и описать внутриатомные процессы в более сложных, чем атом водорода, многоэлектронных атомах (например, рассеяние электронов атомами, интенсивность и поляризацию спектральных линий сложных атомов, аномальный эффект Зеемана и др.) [4, 5]. Было видно, что при всех своих успехах квантовая теория атома, разработанная Н. Бором и уточненная А. Зоммерфельдом, имеет и серьезные недостатки. История развития мировой физической науки показала, что метод квантования Бора-Зоммерфельда явился переходным этапом к последовательной квантовой теории атома, основанной на волновой природе вещества и соответственно на закономерностях волновой механики, главные принципы которой были разработаны к 1927 году известным австрийским физиком Эрвином Шредингером [4, 5].

Из вышеизложенного и истории развития атомной физики следует, что при всех своих достоинствах и недостатках квантовая теория атома Бора, используя соответствующие постулаты, оставила в стороне электрофизическую причинность и сущность протекающих в атомной оболочке квантовых процессов. Физический механизм внутриатомных квантовых явлений в этой теории затуманен и лишен наглядности. Вместо ясных и простых физических представлений и построений, базирующихся на известных понятиях из классической и квантовой электродинамики, специалисту при анализе с ее помощью внутриатомных процессов предлагается лишь формальное знание: схемы электронных переходов и формулы для аналитического расчета геометрических и энергетических характеристик уровней (стационарных орбит электронов), энергий и частот квантов излучения (поглощения). И, наконец, при всем этом данная общепризнанная квантовая теория атома, выдержавшая суровое испытание опытом и временем и ставшая классической, и в настоящее время сохраняет свое не только научно-историческое, но и широкое научно-практическое, мировоззренческое и методическое значение. Кроме того, не следует выпускать из виду и того важного обстоятельства, что современные опытные данные из атомной и ядерной физики явно подтверждают допустимость электронного оболочечного представления в строении атома любого вещества [5, 6].

Целью данной работы является дальнейшее развитие квантовой теории атома Бора и ее наполнение электрофизической сущностью и наглядностью на основе нового электродинамического подхода в описании микроэлектромеханических внутриатомных процессов в веществе и известных электротехнических и квантовомеханических закономерностей.

## 2. ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ АТОМА ВЕЩЕСТВА

Рассмотрим в сферической системе координат микроэлектромеханические процессы в уединенном простейшем атоме вещества – атоме водорода, удовлетворяющем квантовой атомной теории Бора [5]. Примем, что в соответствии с постулатами Бора круговые стационарные орбиты (энергетические уровни)

его атомной оболочки отвечают правилу квантования Бора-Зоммерфельда, а их радиус  $r_{en}$  определяется из следующего выражения [6]:

$$r_{en} = \frac{n^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot h^2}{\pi \cdot m_e \cdot e_0^2}, \quad (1)$$

где  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона;  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – электрический заряд электрона;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $n = 1, 2, 3, \dots$  – главное квантовое число, нумерующее электронные орбиты атома по мере их удаления от его ядра.

При описании внутриатомных процессов воспользуемся как "боровской" скоростью  $v_{en}$  электрона на  $n$ -ой круговой стационарной орбите [6],

$$v_{en} = \frac{e_0^2}{2 \cdot n \cdot \varepsilon_0 \cdot h}, \quad (2)$$

так и известным выражением для полной энергии электрона  $W_{en}$  на  $n$ -ой стационарной электронной орбите оболочки атома Бора [6]:

$$W_{en} = - \frac{m_e \cdot e_0^4}{8 \cdot n^2 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^2}. \quad (3)$$

Знак минус в (3) означает, что в атоме водорода энергия электрона  $W_{en}$  меньше той, которая принимается за нулевую. Заметим, что для рассматриваемого случая нулевой уровень потенциала кулоновского взаимодействия электрона с протоном принимается на бесконечном удалении электрона от ядра (протона) атома водорода ( $n \rightarrow \infty$  и  $r_{en} \rightarrow \infty$ ). При этом для конечного расстояния от ядра атома ( $r_{en} < \infty$ ) полная энергия электрона  $W_{en}$  будет являться величиной отрицательной, а его отрицательная потенциальная энергия будет равна работе, которую необходимо затратить для перемещения электрона с соответствующего энергетического уровня на бесконечность против действия электростатической силы его притяжения к протону. Ограничимся случаем нерелятивистского приближенного описания квантовых микроэлектромеханических процессов в атоме, когда возможно использование понятия об электрическом потенциале электрона оболочки и нуклона ядра [5, 7]. Считаем, что ядро рассматриваемого нами атома находится в состоянии покоя, а влиянием окружающих этот атом микрообъектов на исследуемые внутриатомные процессы пренебрегаем. Требуется с учетом принятых допущений дополнить и расширить квантовую теорию атома Бора новыми электрофизическими положениями, базирующимися на электродинамическом подходе при описании микроэлектромеханических внутриатомных процессов в веществе.

## 3. ОСНОВНЫЕ ИДЕИ И РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

Так как вращающийся на стационарной  $n$ -ой орбите радиусом  $r_{en}$  оболочки атома электрон создает

круговой квантованный электрический ток  $i_{en}$ , то согласно законам классической и квантовой электродинамики [8, 9] такой орбитальный ток будет вызывать появление в пространстве между связанным электроном с отрицательным электрическим зарядом  $e_0$  и положительно заряженным ядром атома с аналогичной величиной заряда  $e_0$  квантованного орбитального магнитного потока  $\Phi_{en}$ . Величину указанного квантованного орбитального электрического тока  $i_{en}$  атома можно вычислить по следующей формуле:

$$i_{en} = \frac{e_0}{T_{en}}, \quad (4)$$

где  $T_{en} = 2\pi/\omega_{en}$  – квантованный период обращения электрона на  $n$ -ой стационарной орбите атома;  $\omega_{en} = v_{en}/r_{en}$  – квантованная круговая частота вращения электрона на рассматриваемой атомной орбите.

Учитывая (1) и (2), выражение для квантованного периода  $T_{en}$  орбитального обращения электрона в атоме принимает вид:

$$T_{en} = \frac{4 \cdot n^3 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3}{m_e \cdot e_0^4}. \quad (5)$$

Тогда с учетом (4) и (5) в окончательном виде выражение для квантованного орбитального электрического тока  $i_{en}$  в атоме запишется в виде:

$$i_{en} = -\frac{m_e \cdot e_0^5}{4 \cdot n^3 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) видно, что по мере удаления стационарных электронных орбит от ядра атома (возрастания квантового числа  $n$ ) значения периода  $T_{en}$  орбитального обращения электрона увеличиваются прямо пропорционально  $n^3$ , а значения орбитального электрического тока  $i_{en}$  – уменьшаются обратно пропорционально  $n^3$ . Численная оценка по (6) величины орбитального электрического тока  $i_{en}$  в атоме водорода показывает, что для основной стационарной орбиты атомной оболочки ( $n=1$ ) она принимает значение, равное  $i_{e1} = -1,053$  мА. Что касается изменения  $\Delta i_{mn}$  квантованного орбитального электрического тока в рассматриваемом нами атоме при переходе электрона, например, с его более удаленной от ядра  $m$ -ой стационарной орбиты на более близкую к ядру  $n$ -ую орбиту ( $m > n$ ), то оно согласно (6) принимает следующий вид:

$$\Delta i_{mn} = \left( \frac{1}{n^3} - \frac{1}{m^3} \right) \cdot \frac{m_e \cdot e_0^5}{4 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3}. \quad (7)$$

Из (7) нетрудно видеть, что при вышеуказанном межорбитальном переходе электрона в водородоподобном атоме изменение  $\Delta i_{mn}$  квантованного орбитального электрического тока является величиной положительной ( $\Delta i_{mn} > 0$ ).

Согласно экспериментальным данным из области физики твердого тела [10] квантованный орбиталь-

ный магнитный поток  $\Phi_{en}$  внутри атома вещества, обусловленный квантованным орбитальным электрическим током  $i_{en}$  по (6), может принимать только значения, кратные некоторой постоянной величине  $\Phi_0 = h/2e_0$ , называемой квантом магнитного потока и численно равной  $2,068 \cdot 10^{-15}$  Вб. В этой связи для величины орбитального магнитного потока  $\Phi_{en}$  на  $n$ -ой стационарной орбите атома можно записать следующее выражение:

$$\Phi_{en} = \frac{nh}{2e_0}. \quad (8)$$

Далее, исходя из принятых допущений, выражение (3) для полной энергии электрона  $W_{en}$  на  $n$ -ой стационарной орбите атома представим в таком виде:

$$W_{en} = e_0 \cdot \varphi_{en}, \quad (9)$$

где  $\varphi_{en}$  – квантованный орбитальный электрический потенциал электрона на  $n$ -ой стационарной орбите атома, являющийся скалярной величиной и равный работе, совершаемой силами электрического поля при перемещении (удалении) единичного положительного заряда с соответствующей орбиты атомной оболочки в бесконечно удаленную точку с нулевым электрическим потенциалом [11].

В результате из (3) и (9) для величины квантованного орбитального электрического потенциала  $\varphi_{en}$  электрона на  $n$ -ой стационарной орбите атома получаем:

$$\varphi_{en} = -\frac{m_e \cdot e_0^3}{8 \cdot n^2 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^2}. \quad (10)$$

Зная из электротехники (электродинамики), что закон электромагнитной индукции (ЭМИ) Майкла Фарадея справедлив как для макроскопических, так и микроскопических электрических контуров и совершенно не зависит от природы вещества, в котором он действует [2, 12], осуществим на его основе проверку справедливости вышеприведенных соотношений (5), (8) и (10). В этом случае с учетом закона ЭМИ Фарадея [6, 11] для  $n$ -ой стационарной орбиты атома запишем нижеследующее приближенное выражение:

$$-\frac{\Delta \Phi_{en}}{\Delta t_{en}} = u_{en}, \quad (11)$$

где  $\Delta \Phi_{en}$  – изменение квантованного орбитального магнитного потока  $\Phi_{en}$  на рассматриваемой  $n$ -ой электронной орбите за время  $\Delta t_{en}$ , равное соответствующему квантованному периоду  $T_{en}$  орбитального обращения электрона в атоме;  $u_{en}$  – скалярная величина квантованной электродвижущей силы (ЭДС) на  $n$ -ой стационарной орбите электрона в атоме, определяющей способность стороннего магнитного поля вызывать в замкнутом электрическом контуре  $n$ -ой стационарной орбиты электрона квантованный электрический ток  $i_{en}$ .

Мысленно разрезав в одном месте замкнутый круговой электрический контур  $n$ -ой стационарной орбиты электрона в атоме водорода двумя бесконечно

близкими параллельными плоскостями, нормально расположенными к плоскости рассматриваемого электрического контура, мы можем в зоне разреза одному краю этого контура условно присвоить нулевой электрический потенциал, а другому противоположному краю контура – квантованный орбитальный электрический потенциал  $\varphi_{en}$ . Тогда скалярную величину ЭДС  $u_{en}$  в рассматриваемом нами своеобразном электрическом контуре на  $n$ -ой электронной орбите исследуемой атомной оболочки можно трактовать как разность электрических потенциалов в зоне его условного разреза, численно равную  $\varphi_{en}$  и соответственно равную работе, совершаемой силами орбитального электрического поля при перенесении единичного положительного заряда вдоль указанного кругового участка  $n$ -ой стационарной электронной орбиты атома [11].

Так как при выполнении равенства  $\Delta t_{en} = T_{en}$  величина  $\Delta\Phi_{en}$  оказывается точно равной орбитальному магнитному потоку  $\Phi_{en}$  по (8), то из (5) и (11) следует, что величина ЭДС  $u_{en}$  становится тождественно равной орбитальному электрическому потенциалу  $\varphi_{en}$  электрона на  $n$ -ой стационарной орбите атома, определяемому согласно (10). Это может служить одним из доказательств правомерности предлагаемого электродинамического подхода для приближенного описания сложных микроэлектромеханических процессов в исследуемом атоме вещества.

Используя введенное нами понятие квантованного орбитального электрического потенциала  $\varphi_{en}$  согласно (10), определим круговую частоту излучения  $\omega_{mn}$  кванта энергии при переходе электрона с его более удаленной от ядра  $m$ -ой стационарной орбиты в атоме на более близкую к ядру  $n$ -ую орбиту ( $m > n$ ). Для этого с учетом (9) и формулы Планка воспользуемся следующим соотношением:

$$\frac{h \cdot \omega_{mn}}{2 \cdot \pi} = e_0 \cdot \Delta\Phi_{mn}, \quad (12)$$

где  $\Delta\Phi_{mn}$  – изменение орбитального электрического потенциала электрона при его переходе с  $m$ -ой на  $n$ -ую стационарную орбиту атома.

В соответствии с (10) для величины приращения  $\Delta\Phi_{mn}$  орбитального электрического потенциала электрона при его рассматриваемом переходе в атоме получаем:

$$\Delta\Phi_{mn} = \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \cdot \frac{m_e \cdot e_0^3}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^2}. \quad (13)$$

Тогда из (12) и (13) для круговой частоты излучения  $\omega_{mn}$  кванта энергии в атоме имеем:

$$\omega_{mn} = \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \cdot \frac{\pi \cdot m_e \cdot e_0^4}{4 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3}. \quad (14)$$

Из (14) следует, что полученное нами на основании электродинамического подхода значение  $\omega_{mn}$  в точности соответствует "боровской" круговой частоте кванта излучения в атоме водорода [6]. Кроме того, из

выражения (13) при  $n=1$  и  $m=\infty$  после подстановки в него фундаментальных постоянных может быть численно найдено максимальное значение орбитального электрического потенциала электрона в атоме водорода, составляющее  $\Delta\varphi_{mn}=13,6$  В и соответственно определяющее известную энергию ионизации  $E_0$  этого атома, найденную экспериментальным путем и равную 13,6 эВ или  $2,18 \cdot 10^{-18}$  Дж [5, 6]. Данное обстоятельство также свидетельствует в пользу предлагаемого автором электродинамического подхода для приближенного анализа микроэлектромеханических процессов в простейшем атоме вещества.

В рамках предлагаемого подхода впервые в атомной физике появляется возможность для приближенного аналитического расчета времени (длительности) перехода электрона в атоме водорода с одной стационарной орбиты на другую. Так, при переходе электрона с  $m$ -ой стационарной орбиты в рассматриваемом атоме на  $n$ -ую орбиту ( $m > n$ ) согласно (11) и закону ЭМИ Фарадея будет справедливо следующее приближенное выражение:

$$-\frac{\Delta\Phi_{mn}}{\Delta t_{mn}} = \varphi_{en}, \quad (15)$$

где  $\Delta\Phi_{mn}$  – изменение квантованного орбитального магнитного потока в атоме при переходе электрона с  $m$ -ой на  $n$ -ую стационарную орбиту;  $\Delta t_{mn}$  – длительность перехода электрона с  $m$ -ой на  $n$ -ую стационарную орбиту атомной оболочки.

На основании (8) для изменения орбитального магнитного потока  $\Delta\Phi_{mn}$  в исследуемом атоме запишем:

$$\Delta\Phi_{mn} = \frac{(m-n) \cdot h}{2 \cdot e_0}. \quad (16)$$

В итоге из (15) и (16) с учетом (10) выражение для длительности межорбитального перехода  $\Delta t_{mn}$  электрона в атоме водорода принимает такой вид:

$$\Delta t_{mn} = \frac{4 \cdot n^2 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3 \cdot (m-n)}{m_e \cdot e_0^4}. \quad (17)$$

Из (17) следует, что значение  $\Delta t_{mn}$ , как и значение квантованного радиуса  $r_{en}$  орбиты электрона по (1), прямо пропорционально величине  $n^2$ . Кроме того, из (5) и (17) можно увидеть, что при  $m=2$  и  $n=1$  длительность межорбитального перехода  $\Delta t_{mn}$  электрона оказывается точно равной периоду  $T_{en}$  его обращения вокруг ядра на основной стационарной орбите атомной оболочки. Эти обстоятельства, по нашему мнению, могут свидетельствовать о работоспособности полученной формулы (17). При этом количественная оценка величины  $\Delta t_{mn}$  по (17) показывает, что она при  $m=2$  и  $n=1$  принимает численное значение, равное примерно  $\Delta t_{mn}=1,520 \cdot 10^{-16}$  с. Для количественного сравнения этой величины  $\Delta t_{mn}$  с известными временными параметрами, характерными для электрона, отметим, что в металлических проводниках для свободных электронов с объемной элек-

тронной плотностью  $n_e$  порядка  $10^{29} \text{ м}^{-3}$  при средней длине  $l_e$  их свободного пробега порядка  $10^{-8} \text{ м}$  время релаксации электронов  $\tau_r$ , то есть время, соответствующее величине длины пробега  $l_e$ , составляет численное значение порядка  $10^{-14} \text{ с}$  [13, 14]. Видно, что для рассматриваемого случая длительность межорбитального электронного перехода  $\Delta t_{mn}$  в атоме водорода оказывается существенно меньше времени релаксации свободных электронов  $\tau_r$  в металлическом проводнике. О справедливости подобных численных оценок значений  $\Delta t_{mn}$  и  $\tau_r$  говорит и сравнение наиболее вероятного радиуса  $r_{ew}$  атома водорода для его основного энергетического состояния ( $n=1$ ), равного первому "боровскому" радиусу орбиты электрона в исследуемом атоме  $r_{ew}=r_{e1}=0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ , и указанной выше величины средней длины пробега  $l_e=10^{-8} \text{ м}$  свободного электрона в металле [13, 15].

Из анализа полученных выражений (6), (7), (10) и (15)–(17) вытекает, что при переходе в атоме водорода электрона с  $m$ -ой на  $n$ -ую стационарную орбиту ( $m > n$ ) уменьшение во времени орбитального магнитного потока ( $\Phi_{en} < \Phi_{em}$ ) будет вызывать увеличение орбитального электрического тока ( $i_{en} > i_{em}$  и  $\Delta i_{mn} > 0$ ). Такие изменения в исследуемом атоме орбитальных магнитных потоков  $\Phi_{em}$ ,  $\Phi_{en}$  и орбитальных электрических токов  $i_{em}$ ,  $i_{en}$  полностью соответствуют закону ЭМИ Фарадея [6, 11], когда обусловленный изменяющимся во времени магнитным потоком индукционный электрический ток в веществе будет противодействовать изменению, порождающему его (этот ток). В результате такого противодействия возрастание во времени магнитного потока будет приводить к уменьшению индукционного электрического тока в веществе, а его (потока) временное уменьшение – к увеличению соответствующего тока. Такому электрофизическому (электродинамическому) механизму, как мы теперь видим, подчиняются и микроэлектромеханические процессы, протекающие для связанных электронов в атомной оболочке рассматриваемого атома вещества.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый электродинамический подход для нерелятивистского приближенного описания микроэлектромеханических процессов в простейшем атоме вещества – атоме водорода, базирующийся, в основном, на квантовой теории атома Бора и законе электромагнитной индукции Фарадея.

2. Показано, что в рассматриваемом атоме вещества каждой разрешенной условием квантования Бора-Зоммерфельда  $n$ -ой стационарной орбите ( $n$ -му энергетическому уровню) соответствует свой квантованный орбитальный электрический ток  $i_{en}$ , квантованный орбитальный электрический потенциал  $\Phi_{en}$  и квантованный орбитальный магнитный поток  $\Phi_{en}$ .

3. Межорбитальный переход электрона в атомной оболочке исследуемого атома сопровождается квантованными изменениями орбитального электрического тока  $i_{en}$ , орбитального электрического потенциала  $\Phi_{en}$  и орбитального магнитного потока  $\Phi_{en}$ , удовлетворяющими закону электромагнитной индукции Фарадея и положениям квантовой теории атома Бора.

4. На основании предложенного подхода для рассматриваемого атома вещества впервые выполнен приближенный аналитический расчет длительности перехода электрона  $\Delta t_{mn}$  с  $m$ -ой на  $n$ -ую стационарную орбиту атомной оболочки ( $m > n$ ).

5. Полученные приближенные расчетные результаты по исследованию в атоме водорода микроэлектромеханических внутриатомных процессов углубляют наши знания по электрофизическому (электродинамическому) механизму, лежащему, как мы можем теперь обоснованно предположить, в основе протекающих в веществе на атомарном уровне материальных явлений микромира.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иосифьян А.Г. Эволюция физических основ электротехники и электродинамики// Электричество.-1987.-№12.-С.18-29.
- [2] Иосифьян А.Г. Эволюция физических основ электротехники и электродинамики// Электричество.-1989.-№9.-С.16-26.
- [3] Астафуров В.И., Бусев А.И. Строение вещества.- М.: Просвещение, 1977.-160с.
- [4] Кудрявцев П.С. Курс истории физики.- М.: Просвещение, 1974.-312с.
- [5] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики/ Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.-864с.
- [6] Кухлинг Х. Справочник по физике/ Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина.- М.: Мир, 1982.-520с.
- [7] Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники/ Под ред. Б.Х. Кривицкого, В.Н. Дулина, Т.1.-М.: Энергия, 1977.-504с.
- [8] Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.Н., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика.- М.: Наука, 1980.-704с.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред.- М.: Гостехиздат, 1957.-532с.
- [10] Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников.- М.: Наука, 1982.-238с.
- [11] Тамм И.Е. Основы теории электричества.- М.: Наука, 1976.-616с.
- [12] Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля.- М.: Гостехиздат, 1954.-687с.
- [13] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972.-391с.
- [14] Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости// Электротехника.-2005.-№7.-С.25-33.
- [15] Баранов М.И. Квантовомеханическая модель быстрого нагрева проводника электрическим током проводимости большой плотности// Электротехника.-2006.-№4.-С.38-44.

Поступила 27.01.2006

## ВИХРЕВЫЕ ТОКИ В ПЛОСКИХ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВКАХ

Батыгин Ю.В., д.т.н., проф.

Национальный технический университет Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Высшая математика".  
тел. (057) 707-60-87, email: batygin@kpi.kharkov.ua

Чаплыгин Е.А.,

Харьковский Национальный автомобильно-дорожный университет  
Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, "Автомобильная электроника"  
тел. (057) 700-38-52, email: chaplygin\_e\_a@mail.ru

*Проведено теоретичний у одновиткових індукторних системах для магніто-імпульсної обробки листових металів з кінцевою удільною електропровідністю. Дійсність отриманих результатів підтверджується граничними переходами. Встановлено, що зсув за фазою між індуктованим сигналом та струмом у індукторі належить до діапазону  $\Delta\varphi \in [0.5\pi, \pi]$ .*

*Проведен теоретичний в одновиткових індукторних системах для магнітно-імпульсної обробки листових металів з кінцевою удільною електропровідністю. Достовірність отриманих результатів підтверджується граничними переходами. Встановлено, що сдвиг по фазі между індуктованим сигналом и током в індукторе приналежить діапазону  $\Delta\varphi \in [0.5\pi, \pi]$ .*

Практическое использование энергии импульсных электромагнитных полей предоставляет уникальные возможности для создания новых современных технологий.

Отличительной особенностью которых, является отсутствие непосредственного контакта с обрабатываемым материалом. В этом нет необходимости, поскольку трансформация энергии поля в механическую работу происходит собственно в материале заготовки, подлежащей обработке. Практический смысл этой особенности проявляется, например, в сравнении механической штамповки с электромагнитной. Так, для реализации последней на современном уровне импульсной техники не требуется пуансон. Более того, в недалеком будущем такие технологии позволят обрабатывать материалы исключительно силами поля заданной пространственно-временной геометрии. В электромагнитной штамповке исчезнет и матрица, форму которой требуется придать обрабатываемой заготовке [1, 2]. Как известно, производственной практикой наиболее апробированы магнитно-импульсные методы обработки массивных металлических объектов с высоким значением удельной электропроводности. Современные технологии требуют расширения и включения металлов с низкой проводимостью в номенклатуру материалов, подлежащих обработке силами магнитного давления. Процессы взаимодействия поля с тонкостенными заготовками из плохих проводников обладают целым рядом особенностей. Среди них не только диффузия поля, но и появление интенсивной нормальной компоненты магнитной напряженности, существенно искажающей направления действующих пондеромоторных сил и картину возможных деформаций в целом [1, 3].

В экспериментах с низкочастотными (~2.5 кГц) одновитковыми индукторными системами было зафиксировано не простое притяжение тонкого метал-

лического листа к рабочей поверхности витка, а образование вмятины сферической формы на поверхности плоской заготовки [4].

В известной мере, это противоречит практике традиционной магнитно-импульсной обработки металлов, когда силовое воздействие на заготовку ведет к отталкиванию металла от индуктора. Определение вектора сил при этом не вызывает сомнений: его амплитуда пропорциональна разности квадратов касательных компонент напряженности магнитного поля на граничных поверхностях обрабатываемого металла, направление – в сторону ее меньшего значения. Силовое взаимодействие поля с проводящей средой обусловлено появлением сил Лоренца. Их направление устанавливается взаимным расположением вектора магнитной напряженности и вектора тока, возбуждаемого в металле обрабатываемой заготовки [1, 3]. В этой связи вопрос о вихревых токах вызывает не только научный, но и практический интерес.

Следует отметить, что близкие электродинамические задачи рассматривались авторами [4, 6], а с привлечением физической идеализации "прозрачных" проводников возбуждение индуцированных токов описано в работе [5]. Выводы исследований требуют обобщений для случаев, реальных в практике магнитно-импульсной обработки металлов.

Цель настоящей работы – теоретический анализ процессов возбуждения вихревых токов, индуцированных полем плоского одновиткового соленоида, в плоских листовых заготовках из металлов с конечной величиной удельной электропроводности и определение соотношений между временными характеристиками индуцированного тока и тока индуктора.

Для проведения расчётов и анализа процессов возбуждения вихревых токов рассмотрим индукторную систему из одновиткового соленоида и плоской листовой металлической заготовки (рис.1).

Принятая физико-математическая модель соответствует реальной конструкции индукторной системы, первоначально использованной в экспериментах взаимодействия низкочастотных магнитных полей со стальными заготовками.

При решении задачи примем следующие допущения.

- Приемлема цилиндрическая система координат, связанная с рассматриваемой моделью индукторной системы.
- Виток индуктора достаточно тонок и "прозрачен" для действующих полей ( $\Delta \rightarrow 0$ ), так что его металл не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы.
- Система обладает аксиальной симметрией, так что  $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$  ( $\varphi$  - полярный угол).
- Поперечные размеры индукторной системы настолько велики, что в рамках поставленной задачи их можно считать бесконечными.
- В индукторе течёт ток  $I(t)$ , временные параметры которого таковы, что в расчётах вполне приемлемо известное условие квазистационарности происходящих электромагнитных процессов, так что  $\frac{\omega}{c} \cdot \ell \ll 1$  (здесь  $\omega$  - циклическая частота процесса,  $c$  - скорость света в вакууме,  $\ell$  - наибольший характерный геометрический размер системы, в данном случае - это поперечный размер,  $\ell \gg 2R_2$ ).
- Листовая заготовка является достаточно тонкостенной с геометрической -  $\frac{d}{R_{1,2}} \ll 1$  и электродинамической -  $\omega \cdot \tau \ll 1$  точек зрения (в последнем неравенстве:  $\tau = \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$ ,  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума,  $\gamma$  - удельная электропроводность металла заготовки,  $d$  - её толщина).

Уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ( $E_\varphi \neq 0, H_{r,z} \neq 0$ ), преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); & (1) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); & (2) \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z), & (3) \end{cases}$$

где  $p$  - параметр преобразования Лапласа;  $j_\varphi(t, r, z)$  - плотность стороннего тока в индукторе,  $E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\}$ ;

$$H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\}$$

$$j_\varphi(p, r, z) = j(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z+h); j(p) = \frac{I(p)}{R_2 - R_1};$$

$f(r)$  - функция радиального распределения тока в витке индуктора;  $\delta(z+h)$  - дельта функция Дирака.

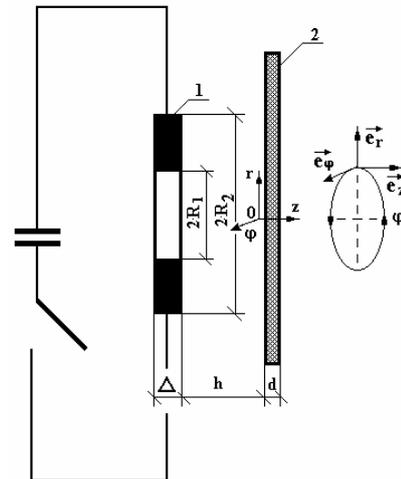


Рис. 1. Схема индукторной системы с одновитковым соленоидом (1) и плоской листовой заготовкой (2),  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z)$  - направляющие орты цилиндрической системы координат

Интегрирование (1) - (3) проведём для каждой из условно выделенных областей:

- а) полупространство вне листовой заготовки со стороны индуктора -  $z \in (-\infty, 0]$ ;
- б) область металла листовой заготовки -  $z \in [0, d]$ ;
- в) свободное полупространство с внешней стороны листовой заготовки -  $z \in [d, \infty)$ .

В рамках принятых допущений уравнения для азимутальной компоненты напряжённости электрического поля  $E_\varphi(p, r, z)$  в каждой из выделенных областей получим из дифференциальной системы (1) - (3).

Вне металла листовой заготовки со стороны индуктора ( $z \in (-\infty, 0]$ ) находим, что

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) \right) \approx p \mu_0 j_\varphi(p, r, z). \quad (4)$$

В металле листовой заготовки ( $z \in [0, d]$ ) имеем:

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) \right) - p \gamma \mu_0 E_\varphi(p, r, z) = 0 \quad (5)$$

Вне металла листовой заготовки ( $z \in [d, \infty)$ ) записываем, что:

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) \right) \approx 0 \quad (6)$$

Условию ограниченности радиального распределения  $E_\varphi(p, r, z)$  из уравнений (4) - (6) при  $r = 0$  и  $r = \infty$  удовлетворяет интегральное преобразование Фурье-Бесселя [6]:

$$E_{\varphi}(p, r, z) = \int_0^{\infty} E_{\varphi}(p, \lambda, z) \cdot J_1(\lambda r) \lambda d\lambda, \quad (7)$$

где  $J_1(\lambda r)$  – функция Бесселя первого порядка.

В соответствии с (7) уравнения (4) – (6) приводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям второго порядка:

а) вне металла листовой заготовки со стороны индуктора,  $z \in (-\infty, 0]$ :

$$\frac{d^2 E_{\varphi}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\varphi}(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \cdot \delta(z+h), \quad (8)$$

где  $K(p, \lambda) = \mu_0 \cdot j(p) \cdot f(\lambda)$ ;  $f(\lambda) = \int_0^{\infty} f(r) \cdot J_1(\lambda \cdot r) r dr$ ;

б) в металле листовой заготовки,  $z \in [0, d]$ :

$$\frac{d^2 E_{\varphi}(p, \lambda, z)}{dz^2} - (\lambda^2 + p \cdot \mu_0 \cdot \lambda) \cdot E_{\varphi}(p, \lambda, z) = 0, \quad (9)$$

в) вне металла листовой заготовки,  $z \in [d, \infty)$ :

$$\frac{d^2 E_{\varphi}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\varphi}(p, \lambda, z) = 0. \quad (10)$$

Общие интегралы уравнений (8), (9) и (10) для выделенных областей имеют вид:

а) в полупространстве вне листовой заготовки со стороны витка индуктора ( $z \in (-\infty, 0]$ ) условию ограниченности при  $z \rightarrow \infty$  удовлетворяет функция:

$$E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z) = C(p, \lambda) e^{\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \eta(z+h) sh(z+h), \quad (11)$$

где  $C(p, \lambda)$  – произвольная постоянная интегрирования;

б) в металле листовой заготовки ( $z \in [0, d]$ ):

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = D_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot z} + D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot z}, \quad (12)$$

где  $D_1(p, \lambda), D_2(p, \lambda)$  произвольные постоянные интегрирования,  $q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p \mu_0 \lambda}$ ;

в) в пространстве за листовой заготовкой ( $z \in [d, \infty)$ ) условию ограниченности при  $z \rightarrow \infty$  удовлетворяет функция:

$$E_{\varphi}^{(3)}(p, \lambda, z) = B(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda z}, \quad (13)$$

где  $B(p, \lambda)$  – произвольная постоянная интегрирования.

Из уравнения (3) с помощью (11), (12) и (13) находим тангенциальную компоненту напряжённости магнитного поля:

а)  $z \in (-\infty, 0]$ :

$$H_r^{(1)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p \mu_0} (C(p, \lambda) \cdot e^{\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \eta(z+h) \cdot ch(z+h)), \quad (14)$$

б)  $z \in [0, d]$ :

$$H_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{q(p, \lambda)}{p \mu_0} (D_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot z} - D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot z}), \quad (15)$$

в)  $z \in [d, \infty)$ :

$$H_{\varphi}^{(3)}(p, \lambda, z) = -\frac{\lambda}{p \mu_0} B(p, \lambda) e^{-\lambda z}. \quad (16)$$

Из условия непрерывности касательных компонент напряжённости электромагнитного поля на границах выделенных областей получаем системы алгебраических уравнений для определения неизвестных произвольных постоянных интегрирования в выражениях (11) – (16):

$z = 0$ :

$$\begin{cases} C(p, \lambda) + p \mu_0 j(p) \cdot \frac{f(\lambda)}{\lambda} \cdot sh(\lambda h) = D_1(p, \lambda) + D_2(p, \lambda); \\ C(p, \lambda) + p \mu_0 j(p) \cdot \frac{f(\lambda)}{\lambda} \cdot ch(\lambda h) = \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} (D_1(p, \lambda) - D_2(p, \lambda)); \end{cases} \quad (17)$$

$z = d$ :

$$\begin{cases} D_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) d} + D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) d} = B(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda d}; \\ \frac{q_2(p, \lambda)}{\lambda} (D_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) d} - D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) d}) = -B(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda d}. \end{cases} \quad (18)$$

В конечном итоге нас интересует электрическое поле в металле заготовки.

Исключая произвольные постоянные интегрирования  $C(p, \lambda)$  и  $B(p, \lambda)$  в системах уравнений (17) и (18), находим неизвестные произвольные константы интегрирования  $D_1(p, \lambda)$  и  $D_2(p, \lambda)$ .

После соответствующих подстановок в формулу (12) и выполнения обратного преобразования Фурье-Бесселя получаем, что

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, r, z) = -2p \mu_0 j(p) \times \int_0^{\infty} \left\{ \frac{f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{G(p, \lambda)} \cdot (sh(q(p, \lambda)(z-d)) - \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \cdot ch(q(p, \lambda)(z-d))) \right\} \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda, \quad (19)$$

где

$$G(p, \lambda) = \left(1 - \frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right)^2 \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot d} - \left(1 + \frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right)^2 \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot d}.$$

Выражение (19) помножим на удельную электропроводность металла заготовки и проинтегрируем по её толщине.

Получим линейную плотность индуцированного тока.

$$j_{\varphi}(p, r) = \gamma \cdot \int_0^d E_{\varphi}(p, r, z) dz = 4\mu_0 \cdot \gamma \cdot p \cdot j(p) \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \operatorname{sh}\left(q(p, \lambda) \frac{d}{2}\right)}{G(p, \lambda) \cdot q(p, \lambda)} \times \left[ \operatorname{sh}\left(q(p, \lambda) \frac{d}{2}\right) + \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \operatorname{ch}\left(q(p, \lambda) \frac{d}{2}\right) \right] \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (20)$$

Формула (20) после интегрирования и введения новых обозначений принимает вид, достаточно удобный для последующих математических операций:

$$I_{\varphi} = -\frac{1}{2} \cdot (\mu_0 \gamma) p \cdot j(p) \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot F(p, \lambda) \cdot d\lambda, \quad (21)$$

где  $F(p, \lambda) = \frac{A(p, \lambda)}{B(p, \lambda)}$ ,

$$A(p, \lambda) = \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right) \cdot \operatorname{sh}(q(p, \lambda)d) + \operatorname{ch}(q(p, \lambda)d) - 1, \\ B(p, \lambda) = q(p, \lambda) \times \left[ \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right)^2\right) \cdot \operatorname{sh}(q(p, \lambda)d) + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right) \cdot \operatorname{ch}(q(p, \lambda)d) \right].$$

В выражении (21) следует выполнить обратное преобразование Лапласа. Данная операция может быть осуществлена с помощью аппарата теории функций комплексного переменного [6].

Для вычисления особых точек подынтегральной функции в формуле (21) произведение продольного волнового числа на толщину листовой заготовки представим как мнимую величину:

$$(q(p, \lambda)d) = i \cdot \beta_k. \quad (22)$$

Подставляя (22) в знаменатель  $F(p, \lambda)$  и приравнявая его к нулю ( $B(p, \lambda) = 0$ ), получаем уравнение для величин  $\beta_k$ :

$$\frac{1}{2} \cdot \left[ \left(\frac{\beta_k}{\lambda d}\right)^2 - 1 \right] \cdot \sin(\beta_k) = \left(\frac{\beta_k}{\lambda d}\right) \cdot \cos(\beta_k) \quad (23)$$

Как следует из (22) и представления (23), особыми точками функции комплексного переменного  $F(p, \lambda)$  являются простые отличные от нуля полюсы  $-p_k$ :

$$p_k = -\frac{1}{\tau} \cdot \left(\beta_k^2 + \lambda^2\right), \quad (24)$$

Далее, в соответствии с теоремой об оригинале дробно-рациональной функции и с теоремой обращения свёртки из выражения (21) находим соответствующую временную зависимость:

$$p \cdot j(p) \cdot F(p, \lambda) \leftrightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A(p_k, \lambda)}{\left(\frac{dB(p_k, \lambda)}{dp}\right)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot e^{p_k t}. \quad (25)$$

Подставляя выражение (25) в формулу (21), находим оригинал для тока, индуцированного в листовой заготовке.

$$I_{\varphi}(t) = -\left(\frac{\tau}{2d^2}\right) \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda} \times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A(p_k, \lambda)}{\left(\frac{dB(p_k, \lambda)}{dp}\right)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot e^{p_k t} \cdot d\lambda. \quad (26)$$

Продолжая вычисления, определяем

$$I_{\varphi}(t) = \frac{1}{d} \cdot \int_{k=0}^{\infty} \frac{f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda} \times \sum_{k=0}^{\infty} \Phi(\beta_k, \lambda) \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot e^{-\frac{(\beta_k^2 + (\lambda d)^2)}{\tau} t} \cdot d\lambda, \quad (27)$$

где

$$\Phi(\beta_k, \lambda) = \frac{\left(\cos(\beta_k) - \frac{\beta_k}{(\lambda d)} \cdot \sin(\beta_k) - 1\right)}{\left(\cos(\beta_k) - \frac{\beta_k}{\lambda d} \cdot \sin(\beta_k) - \frac{1}{\left(\frac{\beta_k}{\lambda d}\right)^2 - 1} \cdot \frac{\cos(\beta_k)}{2} - \frac{\beta_k}{(\lambda d)^2} \sin(\beta_k)\right)}.$$

Формула (27) с подстановкой зависимостей (23), (24) представляет собой аналитическое решение поставленной задачи о возбуждении вихревых токов в листовой заготовке при произвольных частотах действующих магнитных полей.

Говоря о достоверности найденного результата, необходимо отметить, что формула (27), полученная для произвольных параметров электродинамических процессов в индукторной системе, связана и согласуется с ранее полученными результатами в предельных физических ситуациях.

Эту связь можно установить, если при вычислении оригинала, соответствующего выражению (21), функцию  $F(p, \lambda)$  представить в виде отношения

$$F(p, \lambda) = \frac{A(p, \lambda)}{p \cdot B_1(p, \lambda)}, \quad (28)$$

где  $B_1(p, \lambda) = q(p, \lambda) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right)^2\right] \times \operatorname{sh}(q(p, \lambda)d) + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right) \operatorname{ch}(q(p, \lambda)d)\right)$ .

Представление (28) позволяет в полученном оригинале выделить слагаемое, соответствующее состав-

ляющей индуцированного тока -  $I_{\varphi 0}(t)$ , обусловленное достаточно низкими частотами возбуждающего сигнала ( $|p\mu_0\gamma| \ll \lambda^2$  и  $q(p,\lambda) \approx \lambda$ ) или, так называемую, низкочастотную составляющую индуцированного тока.

С учётом принятого для  $F(p,\lambda)$  представления (28) временная зависимость из выражения (21) в соответствии с теоремой Хевисайда и теоремой об изображении свёртки функций запишется как

$$p^2 \cdot j(p) \cdot F(p,\lambda) \leftrightarrow \frac{dj(t)}{dt} \cdot \frac{A(p=0,\lambda)}{B(p=0,\lambda)} + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A(p_k,\lambda)}{p_k \cdot \frac{dB(p_k,\lambda)}{dp}} \cdot \left( \frac{d^2 j(t)}{dt^2} + \frac{dj(0)}{dt} \right) \cdot e^{p_k t}, \quad (29)$$

где  $p_k$  – простые, отличные от нуля, корни знаменателя дроби (28).

Подставляя выражение (29) в формулу (21), оригинал для тока, индуцированного в листовой заготовке, можно записать в виде суммы двух слагаемых:

$$I_{\varphi}(t) = I_{\varphi 0}(t) + I_{\varphi \infty}(t), \quad (30)$$

где  $I_{\varphi 0}(t)$  – низкочастотная компонента индуцированного тока,

$$I_{\varphi 0}(t) = -\left( \frac{\tau}{2d^2} \right) \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\lambda} \cdot \frac{A(p=0,\lambda)}{B(p=0,\lambda)} \cdot d\lambda,$$

$I_{\varphi \infty}(t)$  – высокочастотная компонента индуцированного тока,

$$I_{\varphi \infty}(t) = -\left( \frac{\tau}{2d^2} \right) \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\lambda} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A(p_k,\lambda)}{p_k \cdot \frac{dB(p_k,\lambda)}{dp}} \times \left( \frac{d^2 j(t)}{dt^2} + \frac{dj(0)}{dt} \right) \cdot e^{p_k t} \cdot d\lambda.$$

Простые полюса -  $p_k$  были найдены ранее. Они определяются выражением (24).

Вычислим слагаемые индуцированного тока в формуле (30).

Для низкочастотной составляющей получаем, что

$$I_{\varphi 0}(t) = -\frac{dj(t)}{dt} \cdot \left( \frac{\tau}{2 \cdot d^2} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda h})}{\lambda^2} d\lambda \right). \quad (31)$$

Найденная низкочастотная составляющая индуцированного тока полностью согласуется с результатом, ранее полученным в работе [5], для идеализации "прозрачных" листовых заготовок.

Продолжая вычисления, находим, что:

$$\begin{aligned} \Phi(\beta_k, \lambda) &= \frac{A(p_k, \lambda)}{p_k \cdot \frac{dB(p_k, \lambda)}{dp}} = \\ &= \frac{-2d \left( \cos(\beta_k) - \frac{\beta_k}{\lambda} \cdot \sin(\beta_k) - 1 \right)}{(\beta_k^2 + (\lambda d)^2)} \times \\ &\times \frac{1}{\left( \frac{\cos(\beta_k) - \beta_k \sin(\beta_k)}{\lambda d} - \left( \frac{\beta_k}{\lambda d} \right)^2 - 1 \right)} \times \\ &\times \frac{1}{\frac{\cos(\beta_k)}{2} - \frac{\beta_k}{(\lambda d)^2} \sin(\beta_k)}, \end{aligned} \quad (32)$$

где  $\beta_k$  – корни уравнения (23).

Теперь выражение для высокочастотной компоненты индуцированного тока  $I_{\varphi \infty}(t)$  принимает вид:

$$I_{\varphi \infty}(t) = -\left( \frac{\tau}{2d^2} \right) \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\lambda} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \Phi(\beta_k, \lambda) \times \left( \frac{d^2 j(t)}{dt^2} \cdot e^{\frac{(\beta_k^2 + (\lambda d)^2)}{\tau}} + \frac{dj(0)}{dt} \cdot e^{-\frac{(\beta_k^2 + (\lambda d)^2)}{\tau} t} \right) \cdot d\lambda. \quad (33)$$

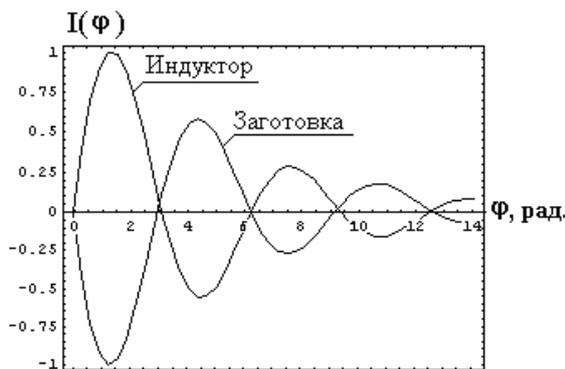
Формула (30) с подстановкой зависимостей (31) и (33), так же как и ранее полученное выражение (27), представляет собой аналитическое решение поставленной задачи о возбуждении вихревых токов в листовой заготовке при произвольных частотах действующих магнитных полей. Отличительной особенностью зависимости (30) является выделение низко и высокочастотных компонент индуцированного тока.

Проведём количественные оценки, иллюстрирующие развитие во времени электромагнитных процессов в обрабатываемых заготовках.

Так же как и ранее в работе [5], расчёты проведём для индукторной системы с  $h=0.0005$  м,  $R1=0.05$  м,  $R2=1.25 \cdot R1 \approx 0.625$  м, работающей в частотном диапазоне  $f \leq 100$  кГц.



а)



б)

Рис. 2. Временная зависимость тока, индуцированного в заготовке из листовой меди толщиной  $\sim 0.001$  м, а) рабочая частота действующего поля  $f=100$  кГц; б) рабочая частота действующего поля  $f=7.5$  кГц

Результаты проведенных расчётов индуцированных токов в относительных единицах (нормировка производилась на соответствующие максимальные величины) представлены на рис. 2.

Из результатов вычислений следует, что

- определение высокой или низкой частоты в рассматриваемом электромагнитном процессе тесно связано с величиной удельной электропроводности металла обрабатываемой заготовки (при одинаковой геометрической толщине);
- на высоких частотах действующих полей для заготовок из хороших проводников индуцированный сигнал с высокой степенью точности повторяет форму тока в индукторе, но имеет противоположное направление, или, что одно и то же - имеет сдвиг по фазе относительно тока в индукторе на  $\Delta\varphi \approx \pi$  (рис. 2а);
- на низких частотах ток, индуцированный в заготовке, относительно тока в индукторе имеет сдвиг по фазе на  $\Delta\varphi < 0.5\pi$  (рис. 2б);
- строгие расчёты, выполненные без упрощающих предположений о характере протекающих электромагнитных процессах, полностью подтверждают достоверность результатов, найденных для предельных физических ситуаций в работе [5];
- изменения направления индуцированного тока по сравнению с режимом резкого поверхностного эффекта не происходит.

### ВЫВОДЫ

1. Выполнен теоретический анализ процесса возбуждения вихревых токов магнитным полем одновиткового индуктора в плоской листовой заготовке из металла с конечным значением удельной электропроводности.

2. Показано, что величина фазового сдвига индуцированного тока относительно тока в индукторе заключена в интервале  $\Delta\varphi \in [0.5\pi, \pi]$ .

3. В режиме резкого поверхностного эффекта направление вихревых токов в заготовке противоположно направлению тока в индукторе, при существенном проникновении поля направление наведенно-

го относительно индуцирующего тока не изменяется, хотя разность фаз между ними снижается до  $0.5\pi$ .

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. // Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. Харьков: - изд. МОСТ-Торнадо. - 2003. - 284 с.
- [2] Бажинов А. В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е. А. Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности // Автомобильный транспорт / Сб. научн. трудов. - Харьков: Изд-во ХНАДУ. - 2005. - Вып.16. - с.349-352.
- [3] Подольцев А.Д., Кучерявая И. Н. Элементы теории численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах // Ин-т электродинамики НАН Украины. - 1999г. - с.143.
- [4] Yu.V.Batygin, V.I.Lavinsky, L.T.Khimenko, Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P.157-160.
- [5] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И Чаплыгин Е. А., Особенности токов индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах // Электротехника и электромеханика / Журнал. - Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ". - 2005. - №3. - с.69-73.
- [6] Шнейерсон Г.А., Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. Л: Энергоиздат. 1981.- 200с.
- [7] Дж.Мэтьюз, Р.Рокер, Математические методы физики. Пер. с англ. канд.физ.-мат наук В.П. Крайнова. Москва: Атомиздат. 1972. 399 с.

Поступила 03.02.2006

## ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Кравченко В.И., д.т.н., проф., Яковенко И.В., д.ф.-м.н., г.н.с., Глухов Е.В., н.с.  
 НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
 Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"  
 тел./факс (057) 707-61-33, e-mail: nipkimolniya@kpi.kharkov.ua

*Визначено вирази для енергії випромінювання електромагнітних коливань у системі напівпровідникова плазма – потік заряджених частинок при збудженні коливань у субміліметровому діапазоні. Запропонована аналітична модель механізму взаємодії електромагнітних коливань та струмів заряджених частинок, що виникає внаслідок дії імпульсного електромагнітного випромінювання у провідних елементах електрорадіовиробів, що містять напівпровідникові надзрети.*

*Определена энергия излучения электромагнитных колебаний в системе полупроводниковая плазма – поток заряженных частиц при возбуждении колебаний в субмиллиметровом диапазоне. Предложена аналитическая модель механизма взаимодействия электромагнитных колебаний и токов, возникающих вследствие воздействия электромагнитного излучения в проводящих элементах электрорадиоизделий, содержащих полупроводниковые сверхрешетки.*

### ВВЕДЕНИЕ

Расширение областей применения и возрастание быстродействия радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) приводит к необходимости все большего использования элементной базы, содержащей изделия полупроводниковой электроники [1]. Это увеличивает степень влияния внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) на работоспособность РЭА, к воздействию которого полупроводниковые комплекты обладают повышенной чувствительностью.

Все многообразие отказов, возникающих в РЭА как результат воздействия сторонних факторов, принято разделять на обратимые и необратимые [2]. Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности РЭА. Они наступают в случае, когда изменение внутренних параметров аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего ЭМИ необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектующих).

Для обратимых отказов характерна временная утрата работоспособности, приводящая к искажению выходных характеристик. Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), однако вопросы связанные с определением различного рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделия при воздействии ЭМИ остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области ис-

следований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном параграфе показано, что использование потока заряженных частиц, модулированного на частоте поверхностной волны, позволяет существенным образом повысить уровень излучения, поскольку процесс излучения носит коллективный характер [3]. Такой способ представляется нам довольно перспективным для возбуждения поверхностных волн различного рода в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

Пусть границу  $y = 0$  раздела двух сред, направленную вдоль оси абсцисс, пересекает промодулированный на частоте  $\omega$ , квазинейтральный поток заряженных частиц, движущихся вдоль оси  $y$  со скоростью  $v_0$ .

Поля, создаваемые потоком в каждой среде, будем описывать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= \frac{i\omega}{c} \mathbf{H}; \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = -\frac{i\omega}{c} \varepsilon \mathbf{E} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}; \\ \varepsilon \operatorname{div} \mathbf{E} &= 4\pi en; \quad \mathbf{j} = en_0(x)\mathbf{v}(x, y) + e v_0 n(x, y); \quad (1) \\ \mathbf{E} &= (E_x, E_y, 0); \quad \mathbf{H} = (0, 0, H_z); \\ \varepsilon &= \varepsilon(y); \quad \varepsilon = \varepsilon_1, y \leq 0; \quad \varepsilon = \varepsilon_2, y > 0, \end{aligned}$$

где  $e$  – заряд;  $n_0(x)$  – равновесная плотность электронов;  $n$  и  $\mathbf{v}$  – отклонения плотности и скорости электронов от равновесных значений. Величины  $n$  и  $\mathbf{v}$  связаны между собой системой линейных гидродинамических уравнений:

$$\begin{aligned} \left(-i\omega + v_0 \frac{\partial}{\partial y}\right) n + \operatorname{div} n_0 \mathbf{v} &= 0 \\ \left(-i\omega + v_0 \frac{\partial}{\partial y}\right) \mathbf{v} &= \frac{e}{m} \mathbf{E}. \end{aligned} \quad (2)$$

Электронный пучок предполагается ограниченным в направлении  $x$  и безграничным в направлении  $y$  и  $z$ . Поскольку толщина пучка  $d$  предполагается малой по сравнению с длиной волны, будем считать, что  $n_0(x) = n_{0s} \delta(x)$ , где  $n_{0s} = n_0 d$  – поверхностная плотность электронов. Для бесконечного "тонкого" пучка полагаем  $n(x, y) = n_s(y) \delta(x)$ ,  $v_x = 0$ . После интегрирования уравнений движения, непрерывности и Пуассона по толщине пучка, получим:

$$\begin{aligned} \left(-i\omega + v_0 \frac{\partial}{\partial y}\right) n_s(y) + n_{0s} \frac{\partial}{\partial y} v_y(0, y) &= 0, \\ \left(-i\omega + v_0 \frac{\partial}{\partial y}\right) v_y(0, y) &= \frac{e}{m} E_y(0, y), \\ \varepsilon(\omega) d \frac{\partial E_y(0, y)}{\partial y} &= 4\pi e n_s(y). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь мы положили

$$E_x\left(-\frac{d}{2}\right) - E_x\left(\frac{d}{2}\right) \cong E_x(0) - E_x(0) = 0.$$

Подставляя в систему (3) зависимость всех переменных величин от  $y$  в виде  $e^{iq_y y}$ , находим:

$$\begin{aligned} n_s(y) &= n_+ e^{iq_+ y} + n_- e^{iq_- y}, \\ v_y(y) &= \frac{\omega_b}{\omega} \frac{v_0}{n_{0s}} \left( n_- e^{iq_- y} - n_+ e^{iq_+ y} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $q_y^\pm = \frac{\omega}{v_0} \pm \frac{\omega_b}{v_0}$ ;  $\omega_b^2 = \frac{4\pi e^2 n_{0s}}{m d \varepsilon(\omega)}$ . Амплитуды  $n_\pm$  медленной и быстрой волн пространственного заряда (ВПЗ) в среде "1" (вакууме) находятся из граничных условий на плоскости  $y = -l$ . В качестве таковых могут быть выбраны следующие:  $v_y(-l) = v_1$ ;  $n_s(-l) = 0$ , где  $v_1$  – скорость электрона, возникающая под действием напряжения модуляции. В результате получим

$$\begin{aligned} v_y(y) &= v_1 \cos \frac{\omega_b}{v_0} (l+y) e^{i\frac{\omega}{v_0}(y+l)}; \\ n_\pm^{(1)} &= \mp \frac{\omega}{2\omega_b} \frac{v_1}{v_0} n_{0s} e^{iq_y^\pm l}; \\ n_s(y) &= -i \frac{n_{0s} v_1 \omega}{v_0 \omega_b} \sin \frac{\omega_b}{v_0} (l+y) e^{i\frac{\omega}{v_0}(y+l)}; \\ j_y(y) &= \frac{e n_{0s}}{d} v_1 \left[ \cos \frac{\omega_b}{v_0} (l+y) - \right. \\ &\quad \left. - i \frac{\omega}{\omega_b} \sin \frac{\omega_b}{v_0} (l+y) \right] e^{i\frac{\omega}{v_0}(y+l)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Определим поля, создаваемые модулированным пучком. Поскольку пучок нерелятивистский, то фазовая скорость ВПЗ мала по сравнению со скоростью света, а также по сравнению с фазовой скоростью поверхностной волны. Такие поля можно считать продольными и полагать  $\operatorname{rot} \mathbf{E}^l = 0$ . Представим  $E^l(x, y, \omega)$  в виде:

$$E^l(x, y, \omega) = \int E^l(q_x, y, \omega) e^{iq_x x} dq_x.$$

Воспользовавшись затем уравнением Пуассона (6), где  $n(x, y, \omega) = n_s(y, \omega) \delta(x)$ , получим для продольных полей в каждой из сред следующие выражения:

$$\begin{aligned} E_x^l(q_x, y, \omega) &= \frac{2eq_x}{i\varepsilon} \left( \frac{n_+}{q_+^2} \exp iq_+ y + \frac{n_-}{q_-^2} \exp iq_- y \right); \\ E_y^l(q_x, y, \omega) &= \frac{2e}{i\varepsilon} \cdot \left( \frac{q_y^+}{q_+^2} n_+ \exp iq_+ y + \frac{q_y^-}{q_-^2} n_- \exp iq_- y \right), \end{aligned}$$

где  $q_\pm^2 = q_x^2 + (q_y^\pm)^2$ . (6)

Для нахождения амплитуды поверхностной волны к продольным полям (6) необходимо добавить поперечные  $E^t(x, y, \omega)$ , которые представляют собой решение однородной системы (3). ( $j = 0, n = 0$ )

$$E_x^t(x, y, \omega) = \int B e^{i(q_x x + \kappa y)} dq_x;$$

$$\begin{aligned} E_y^t(x, y, \omega) &= -\int \frac{q_x}{\kappa} B e^{i(q_x x + \kappa y)} dq_x, \\ \kappa &= \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon - q_x^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

Неизвестные величины  $B_1, B_2, n_\pm^{(2)}$  можно выразить через  $n_\pm^{(1)}$ , воспользовавшись граничными условиями при  $y = 0$ . Напомним, что кроме электродинамических условий непрерывности тангенциальных составляющих электрического поля и нормальных составляющих вектора индукции  $D_y = \varepsilon E_y + \frac{4\pi i}{\omega} j_y$  на границе должны выполняться гидродинамические условия. Сюда относятся: непрерывность (равенство) плотности частиц и непрерывность потока частиц. Таким образом, граничные условия при  $y = 0$  принимают вид:

$$\begin{aligned} B_1 + \frac{2eq_x}{i\varepsilon_1} \left( \frac{n_+^{(1)}}{q_+^2} + \frac{n_-^{(1)}}{q_-^2} \right) &= B_2 + \frac{2eq_x}{i\varepsilon_2} \left( \frac{n_+^{(2)}}{q_+^2} + \frac{n_-^{(2)}}{q_-^2} \right); \\ \frac{\varepsilon_1}{\kappa_1} B_1 &= \frac{\varepsilon_2}{\kappa_2} B_2; \\ n_+^{(1)} + n_-^{(1)} &= n_+^{(2)} + n_-^{(2)}; \\ \frac{e n_{0s}}{im} \int \frac{q_x B_1}{\kappa_1} dq_x + \omega_{b1} v_0 (n_-^{(1)} - n_+^{(1)}) &= \\ = \frac{e n_{0s}}{im} \int \frac{q_x B_2}{\kappa_2} dq_x + \omega_{b2} v_0 (n_-^{(2)} - n_+^{(2)}). \end{aligned} \quad (8)$$

Из соотношений (8) находим:

$$B_1 = \frac{\kappa_2 \varepsilon_2 q_x}{i(\kappa_1 \varepsilon_2 - \kappa_2 \varepsilon_1)} (A_2 - A_1), \quad (9)$$

$$E_{1x}^t(x, y, \omega) = \frac{\varepsilon_2}{i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\kappa_2 q_x (A_2 - A_1)}{\kappa_1 \varepsilon_2 - \kappa_2 \varepsilon_1} e^{i(q_x x + \kappa_y y)} dq_x,$$

где  $A_\alpha = \frac{2e}{\varepsilon_\alpha} \left( \frac{n_+^{(\alpha)}}{q_{\alpha+}^2} + \frac{n_-^{(\alpha)}}{q_{\alpha-}^2} \right); \quad \alpha = 1, 2.$

Используя полюс подынтегрального выражения  $\kappa_1 \varepsilon_2 - \kappa_2 \varepsilon_1 = 0$ , где  $\varepsilon_1 > 0$ ,  $\varepsilon_2 < 0$ ,  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 < 0$ , получим следующую формулу для поля поверхностной волны:

$$E_{1x}^s = \frac{2\pi \varepsilon_1^2 \varepsilon_2^2 \omega^2 (A_2 - A_1)}{c^2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \Big|_{q_x = q_{xs}} \cdot e^{i(q_{xs} x + \kappa_s y)}, \quad (10)$$

где  $q_{xs} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}$ ;  $\kappa_s = \frac{\omega}{c} \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}$ ;  $\text{Im } \kappa_s > 0$ .

Из условия (8) находим значение  $A_2 - A_1$  и при

$$\frac{\omega^2}{v_0^2} \gg q_{xs}^2 \text{ имеем}$$

$$A_2 - A_1 = \frac{2e v_0 v_1 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) n_{0s}}{\omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2} \times \left( 2 \cos \beta - i \frac{\omega}{\omega_b} \sin \beta \right) e^{i \frac{\omega}{v_0} l}; \quad \beta = \frac{\omega_b}{v_0} l. \quad (11)$$

Таким образом, амплитуда поверхностной волны определяется величиной потока частиц через границу  $y = 0$ .

Окончательные выражения для тангенциальной составляющей электрического поля поверхностной

волны и вектора Пойтинга  $S_x = \frac{c}{8\pi} \text{Re } E_y H_z^*$  в среде

"1" принимают вид:

$$E_{1x}^s(x, y, \omega) = \frac{4\pi e v_0 v_1 n_{0s} \varepsilon_1 \varepsilon_2}{c^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \times \left( 2 \cos \beta - i \frac{\omega}{\omega_b} \sin \beta \right) e^{i \left( q_{xs} x + \kappa_s y + \frac{\omega}{v_0} l \right)}; \quad (12)$$

$$S_x = \frac{c}{8\pi} \sqrt{\left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right|} \left| E_{1x}^s \right|^2.$$

### ВЫВОДЫ

Видно, что значение плотности потока энергии поверхностной волны осциллирует в зависимости от соотношения между периодом ленгмюровских колебаний электронов пучка и временем пролета частицей  $\tau = l/v_0$  пространства  $l$ , отделяющего плоскость модуляции от границы раздела сред. Это связано с тем, что ленгмюровские колебания переносятся в пространстве со скоростью  $v_0$  и длина волны оказывается равной  $2 \cdot \pi \cdot v_0 / \omega_b$ . По условиям модуляции при

$y = -l$  поток частиц минимален. Таким образом, при  $\beta = N\pi$  ( $N = 1, 2, 3$ ) на расстоянии  $l$  укладывается целое число полуволн и  $S_x$  – минимально. При

$\beta = \frac{\pi}{2}(2N + 1)$  на этом расстоянии укладывается целое число четвертей волн. В этом случае на границе  $y = 0$

создается максимальный поток частиц и  $S_x$  также

достигает наибольшей величины, так как  $\frac{\omega^2}{4\omega_b^2} \gg 1$ .

Приведем для сравнения выражение для плотности потока энергии поверхностной волны, возбуждаемой заряженной лентой. Поскольку ширина ленты  $L$  меньше длины волны, то плотность заряда можно представить в виде  $en(x, y, t) = en_1 \delta(y - v_0 t) \delta(x)$ , где  $en_1$  – плотность на единицу длины ленты. Легко показать, что продольное поле в каждой среде, создаваемое пространственно-временной гармоникой

$$n(x, y, \omega) = \frac{n_1}{L} e^{i \frac{\omega}{v_0} y} \delta(x), \text{ запишется:}$$

$$E_x^l(q_x, y, \omega) = \frac{2 e q_x v_0^2 n_{0s}}{i \omega^2 \varepsilon} e^{i \frac{\omega}{v_0} l}; \quad (13)$$

$$E_y^l(q_x, y, \omega) = \frac{\omega}{q_x v_0} E_x(q_x, y, \omega),$$

где  $n_{0s} = \frac{n_1}{L}$ ,  $\omega^2 \gg q_x^2 v_0^2$ . В этом случае  $E_{1x}^s$  – компонента поля поверхностной волны оказывается равной:

$$E_{1x}^s(x, y, \omega) = \frac{4\pi e n_{0s} v_0^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{c^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} e^{i(q_{xs} x + \kappa_s y)}. \quad (14)$$

Видно, что при условии  $\frac{v_1}{v_0} \gg \frac{\omega_b}{\omega}$  максималь-

ное значение амплитуды поля, создаваемого модулированным пучком, может значительно превышать поле, возникающее в результате переходного излучения заряженной ленты.

### КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В заключение оценим величину плотности потока энергии поверхностной волны для различных значений диэлектрических проницаемостей граничащих сред:  $\varepsilon_1 = 1$ ,  $\varepsilon_2 = \varepsilon(\omega)$ . В случае плазмopodobных сред (металлы, полуметаллы, полупроводники)  $\varepsilon(\omega)$

$$\text{имеет вид } \varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega(\omega + i\nu)}.$$

Частота поверхностной волны  $\omega$  (частота модуляции) должна удовлетворять условию  $\omega_p > \omega > \nu$ ,

где  $\omega_p = \omega_0 / \sqrt{\varepsilon_0}$ . Поскольку  $\varepsilon_0$  и  $\omega_0$  меняются в очень широких пределах (например,  $\varepsilon_0 = (1 \div 100)$ ,

$\omega_0 = (10^{13} \div 10^{15}) \text{ с}^{-1}$ , то легко можно добиться выполнения условий  $|\varepsilon(\omega)| \gg 1$ . В этом случае выражение для плотности потока энергии принимает вид:

$$S_x = S_0 \left( 4 \cos^2 \beta + \frac{\omega^2}{\omega_b^2} \sin^2 \beta \right), \quad (15)$$

$$S_0 = \frac{2\pi e^2 v_0^2 v_1^2 n_0^2 d^2}{c^3 |\varepsilon(\omega)|}.$$

Для электронного пучка с параметрами:

$v_0 = 3 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $n_0 = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$  при  $v_1 = 3 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  получим:

$$S_0 = \frac{1}{|\varepsilon|} \cdot 1,8 \cdot 10^4 \text{ CGSE} = \frac{1,8}{|\varepsilon|} \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2.$$

Положим  $\omega = 10^{12} \text{ с}^{-1}$ . Для полупроводников типа InSb с  $\varepsilon_0 = 16$  и эффективной массой электронов проводимости  $m_e = 10^{-29} \text{ г}$  при температуре жидкого азота  $v = 10^{11} \text{ с}^{-1}$  и концентрации электронов проводимости  $N_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$   $|\varepsilon(\omega)| \cong 14 \gg 1$  получим в условиях резонанса  $\beta = \frac{\pi}{2}(N+1)$ ;  $S_x^{\max} = 42,8 \text{ Вт/см}^2$ . Для металлов с  $\omega_0^2 = 3 \cdot 10^{31} \text{ с}^{-2}$ , на частоте  $\omega = 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ,  $S_x^{\max} = 20 \text{ МВт/см}^2$ . Эта величина вполне обнаружима.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. - М.: Радио и связь, 1988, - 235 с.
- [2] Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. - М.: Радио и связь. 1979. - 225 с.
- [3] Стил М., Вюраль Б. Взаимодействие волн в плазме твердого тела. - М.: Атомиздат, 1973. - 312 с.
- [4] Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М. Электромагнитные явления СВЧ - диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. - Киев: Наукова думка. 1991. - 216 с.
- [5] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Мир. 1984. - 456 с.

Поступила 24.02.2006

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОТОКОМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Кравченко В.И., д.т.н., проф., Яковенко И.В., д.ф.-м.н., г.н.с., Лосев Ф.В., м.н.с.  
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"  
тел. /факс (057) 707-61-33, e-mail: nipkimolniya@kpi.kharkov.ua

*Запропонована аналітична модель механізму взаємодії струмів, що виникають внаслідок дії імпульсного електромагнітного випромінювання у провідних елементах електрорадіовиробів, з власними електромагнітними коливаннями структур метал – діелектрик – напівпровідник. Визначено інкремент нестійкості, обумовлений взаємодією такого роду, що визначає збудження коливань у субміліметровому діапазоні.*

*Предложена аналитическая модель механизма взаимодействия токов, возникающих вследствие воздействия электромагнитного излучения в проводящих элементах электрорадиоизделий с собственными электромагнитными колебаниями структур металл – диэлектрик – полупроводник. Определен инкремент неустойчивости, обусловленный взаимодействием такого рода, определяющий возбуждение колебаний в субмиллиметровом диапазоне.*

### ВВЕДЕНИЕ

Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например, оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), однако вопросы связанные с определением различного рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделия при воздействии ЭМИ остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ-электронике.

Расширение областей применения и возрастание быстродействия радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) приводит к необходимости все большего использования элементной базы, содержащей изделия полупроводниковой электроники [1]. Это увеличивает степень влияния внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) на работоспособность РЭА, к воздействию которого полупроводниковые комплектующие обладают повышенной чувствительностью.

Все многообразие отказов, возникающих в РЭА как результат воздействия сторонних факторов, принято разделять на обратимые и необратимые [2]. Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности РЭА. Они наступают в случае, когда изменение внутренних параметров аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего ЭМИ необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектующих). Для обратимых отказов характерна временная утрата работоспособности, приводящая к искажению выходных характеристик.

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим взаимодействие плазменных колебаний двумерного электронного газа с потоком заря-

женных частиц, который движется по нормали к границе раздела сред.

Пусть на границе двух сред, различающихся электромагнитными свойствами, имеется бесконечно тонкий слой электронов, поведение которых мы будем описывать уравнением Шредингера:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi_k + [\varepsilon_k - V_0 \delta(y)] \Psi_k = 0 \quad (1)$$

с потенциальным барьером  $U(y) = -V_0 \delta(y)$ ,  $\varepsilon_k$  – энергия частицы;  $m_e$  – эффективная масса.

Для нахождения их спектра представим волновую функцию частицы  $\Psi_k$  в областях  $y < 0$  и  $y > 0$  следующим образом:

$$\Psi_{1,2} = B_{1,2k} \exp(\pm \chi y + i(k_x x + k_z z - \varepsilon_k t / \hbar)), \quad (2)$$

где  $k_x, k_z$  – компоненты волнового вектора в направлении, параллельном границе раздела;  $\chi = [k_x^2 + k_z^2 - (2m/\hbar^2)\varepsilon_k]^{1/2} > 0$ .

На границе раздела  $y = 0$  выполняется условие равенства волновых функций, а производные от волновых функций испытывают разрыв:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial \Psi_{1k}(0)}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_{2k}(0)}{\partial y} \right) = -U_0 \Psi_{1k}(0); \quad (3)$$

$$\Psi_{1k}(0) = \Psi_{2k}(0).$$

Отсюда следует:  $\hbar^2 \chi / m_e = V_0$ . Волновая функция нормирована так, что

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \Psi_k^* \Psi_k = N_0 \exp(-2\chi|y|); \quad N_0 - \text{плотность частиц.}$$

Частота плазменных колебаний 2D электронов равна

$$\omega_s^2 = \frac{4\pi e^2 N_0 d |q_x|}{m_e (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}; \quad d = \frac{1}{\chi}; \quad |q_x| d \ll 1. \quad (4)$$

Если предположить, что  $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$ , частота поверхностных плазменных колебаний имеет вид

$$\omega_s = \frac{\Omega_s}{\sqrt{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}; \quad \Omega_s = \sqrt{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 + \omega_0^2 d |q_x|}; \quad \omega_0^2 = \frac{4\pi e^2 N_0}{m_e}. \quad (5)$$

Проведем стандартную процедуру квантования энергии электромагнитного поля поверхностных

плазмонов, получим выражение для оператора вектора-потенциала:

$$\hat{A}_\alpha(\vec{r}, t) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left( \frac{4\pi\hbar c}{V\omega_q(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right)^{1/2} e_l \exp(i\vec{q}_l \vec{r}) (\hat{a}_{\vec{q}}^-(t) + \hat{a}_{-\vec{q}}^+(t)), \quad (6)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  не обладают частотной дисперсией  $l = 1, 2$ .

Предположим далее, что через слой проходит (инжектируется) внешний поток заряженных частиц (электронов). Для нахождения матричных элементов гамильтониана взаимодействия плазмонов с этим потоком воспользуемся следующим выражением:

$$\hat{H}^{\text{int}} = -\frac{1}{c} \int \hat{j}(\vec{r}, t) \cdot \hat{A}(\vec{r}, t) d\vec{r}, \quad (7)$$

где  $\hat{j} = e\hbar/(2im) \sum_{\rho=1}^3 (\hat{\Psi}_\rho^+ \nabla \hat{\Psi}_\rho - \nabla \hat{\Psi}_\rho^+ \hat{\Psi}_\rho)$  – оператор плотности полного электронного тока (включающего падающий ( $\rho = 1$ ), отраженный ( $\rho = 3$ ) и прошедший ( $\rho = 2$ )) токи;  $m$  – эффективная масса инжектируемого электрона. Здесь операторы волновых функций имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}_1 &= \sum_k e^{ik_y y} \hat{\Psi}_k(x, z, t); \\ \hat{\Psi}_2 &= \sum_k \alpha_k e^{-ik_y y} \hat{\Psi}_k(x, z, t); \\ \hat{\Psi}_3 &= \sum_k \beta_k e^{ik_y y} \hat{\Psi}_k(x, z, t); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\hat{\Psi}_k(x, z, t) = \frac{\hat{b}_k(t)}{\sqrt{V}} e^{i(k_x x + k_z z)};$$

$\hat{b}_k^+(t) = \hat{b}_k^+(0) \exp(i(\varepsilon_h/\hbar)t)$  и  $\hat{b}_k^-(t) = \hat{b}_k^-(0) \exp(-i(\varepsilon_h/\hbar)t)$  – операторы рождения и уничтожения электронов;  $V$  – объем системы. Закон дисперсии электронов предполагается квадратичным:

$$E_k = \frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)}{2m_0}.$$

Коэффициенты  $\alpha_k$  и  $\beta_k$  находятся из граничных условий (5.46) для функций  $\hat{\Psi}_{1,2,3}$  и имеют вид:

$$\alpha_k = \frac{i\hbar^2 k_y}{mU_0 + i\hbar^2 k_y}; \quad \beta_k = \frac{-mV_0}{mV_0 + i\hbar^2 k_y}; \quad (9)$$

Оператор энергии взаимодействия частиц с плазмонами запишется:

$$\hat{H}^{\text{int}} = \sum_{\vec{k}'\vec{q}\vec{k}} W^{(p)} \bar{k}'\vec{q}\vec{k} \hat{b}_{\vec{k}'}^+ (\hat{a}_{\vec{q}}^-(t) + \hat{a}_{-\vec{q}}^+(t)) \hat{b}_{\vec{k}}^-(t),$$

где  $W_{\vec{k}'\vec{q}\vec{k}}$  – матричный элемент гамильтониана взаимодействия определяется выражениями:

$$\begin{aligned} W^{(1)}_{\vec{k}'\vec{q}\vec{k}} &= F \frac{k'_y + k_y + i(k'_x + k_x)}{k'_y - k_y + i|q_x|}, \\ W^{(2)}_{\vec{k}'\vec{q}\vec{k}} &= F \frac{k'_y + k_y - i(k'_x + k_x)}{k'_y - k_y - i|q_x|} \alpha_{k'}^* \alpha_k, \\ W^{(3)}_{\vec{k}'\vec{q}\vec{k}} &= F \frac{k'_y + k_y - i(k'_x + k_x)}{k'_y - k_y - i|q_x|} \beta_{k'}^* \beta_k, \end{aligned}$$

$$F = \frac{e}{mV} \left[ \frac{\pi |q_x| \hbar^3}{2\omega_q(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right]^{1/2}.$$

Кинетическое уравнение имеет вид [3]:

$$\frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{\vec{k}'\vec{k}} |W_{\vec{k}'\vec{q}\vec{k}}|^2 [(N_{\vec{q}} + 1)n_{\vec{k}}^{-(p)}(1 - n_{\vec{k}}^{-(p)}) - N_{\vec{q}}n_{\vec{k}}^{-(p)}(1 - n_{\vec{k}}^{-(p)})] \times \delta(E_{\vec{k}'} - E_{\vec{k}} - \hbar\omega_{\vec{q}}). \quad (10)$$

Полагая, что распределение частиц описывается выражением

$$n_{\vec{k}}^{-(p)} = (2\pi)^3 n_p \delta(k_x) \delta(k_y - k_p) \delta(k_z),$$

где

$$n_2 = |\alpha_k|^2 n_1; \quad n_3 = |\beta_k|^2 n_1; \quad k_1 = k_2 = k_0; \quad k_3 = -k_0 \text{ и}$$

принимая во внимание неравенство:  $\frac{\hbar^2 k_0^2}{2} \gg \hbar\omega_q$ ,

получим следующее выражение для инкремента  $\gamma = \frac{\partial N_q}{N_q \partial t}$  поверхностных плазмонов в 2D электронном газе:

$$\gamma = \frac{\partial N_q}{N_q \partial t} = \frac{\omega_b^2 |q_x| v_0}{2\Omega_s} (1 + R^3 + D^3), \quad (11)$$

где  $R = |\beta_k|^2$  – коэффициент отражения частиц от барьера,  $D = |\alpha_k|^2$  – коэффициент прохождения частиц через барьер. Если подставить в формулу (11) значения  $R, D$  через  $k_0, \chi$  и ввести обозначение

$$\frac{\chi^2}{k_0^2} = \eta \text{ получим } \gamma = \frac{\omega_b^2 |q_x| v_0}{\Omega_s} Z, \text{ где } Z = 1 - \frac{3}{2} \frac{\eta^2}{(1 + \eta)^4}.$$

В то же время при  $\chi = \frac{2m_e U_0 a}{\hbar^2}$  следует, что

$$\gamma = \frac{\omega_b^2 |q_x| v_0}{\Omega_s} Y, \text{ где } Y = \frac{1}{1 + \eta}.$$

Таким образом, потенциальный барьер проявляет себя совершенно различным способом в случаях, когда процесс взаимодействия плазмонов и электронов детерминирован или носит характер случайных столкновений.

При  $\eta = 0$  выражения для инкрементов совпадают:  $Z = Y = 1$ . Далее с ростом  $\eta$  функция  $Y$  убывает и при  $\eta \rightarrow \infty$  она обращается в нуль. Функция  $Z$  проходит через минимум при  $\eta = 1$ , а при  $\eta \rightarrow \infty$  она обращается в единицу, т.е. оказывается менее чувствительной к потенциальному барьеру.

При нахождении инкрементов неустойчивости из кинетических уравнений в условиях  $k_0^2 \gg \frac{\omega^2}{v_0^2}$ , мы

рассматривали только процесс рассеяния электронов на потенциале поверхностного плазмона только "вперед" по ходу движения частицы и пренебрегали процессом рассеяния "назад". Сравним величину матричных элементов для этих процессов.

$$\text{Рассмотрим множитель } C = \frac{k'_y + k_y + i(k'_x + k_x)}{k'_y - k_y + i|q_x|}.$$

Положим  $k_y = k_0, k_x = 0, k'_x = q_x$ . Волновой вектор

$k'_y$  рассеянного вперед электрона равен  $k'_y = k_0 \pm \frac{\omega}{v_0}$ .

Тогда имеем:  $|C_1|^2 = \frac{4k_0^2 v_0^2}{\omega^2}$ , так как

$$q_x^2 \ll \frac{\omega^2}{v_0^2}; \quad k_0^2 \gg q_x^2.$$

Волновой вектор электрона рассеянного назад равен  $k'_y = -\left(k_0 \pm \frac{\omega}{v_0}\right)$ .

При этом получим:  $|C_2|^2 = \frac{\omega^2}{4k_0^2 v_0^2}$ .

Видно, что  $\left|\frac{C_2}{C_1}\right|^2 = \frac{\omega^4}{16k_0^4 v_0^4} \ll 1$ . (12)

В заключение отметим, что если кинетическая энергия электрона меньше энергии поверхностного плазмона, то имеет место процесс поглощения энергии поверхностных колебаний. Оценим величину декремента плазмонов при их взаимодействии с моноэнергетическим потоком заряженных частиц, воспользовавшись выражениями (12) и пренебрегая влиянием потенциального барьера на границе раздела сред. Тогда  $\omega_s$  определяется формулой (4), а кинетическое уравнение для плазмонов имеет вид

$$\frac{\partial N_q}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} N_q n_0 \sum_{k_y} |W|^2 \delta(E_{k'} - \frac{\hbar^2 k_0^2}{2m} - \hbar\omega_s). \quad (13)$$

Здесь матричный элемент

$|W| = |W_{k_0 \bar{q} \bar{k}}|^{(1)} + |W_{k_0 \bar{q} \bar{k}}|^{(2)}$  можно положить равным  $2F$ , т.к. волновой вектор рассеянного электрона  $k'_y = \pm k_+$  является наибольшим слагаемым. Подставляя в (13) значение  $|W|^2$  и заменяя суммирование интегрированием находим декремент

$$\gamma = -\frac{\omega_b^2 |q_x|}{\omega_s k_+ (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, \quad (14)$$

где  $k_+ = \sqrt{k_0^2 + \frac{2m\omega_s}{\hbar}}$ .

Видно, что с ростом  $k_0$  абсолютное значение декремента уменьшается и вблизи некоторого порогового значения  $k_0^2 > \frac{2m\omega_s}{\hbar}$  обращается в нуль. Дальнейшее увеличение  $k_0$  приводит к изменению знака  $\gamma$ .

Инкремент при

$$k_0^2 \gg \frac{2m\omega_s}{\hbar}$$

приобретает вид

$$\gamma \approx \frac{\omega_b^2 |q_x| v_0}{\Omega_s}.$$

Для развития неустойчивости необходимо, чтобы величина  $\gamma$  превосходила затухание плазмонов, обусловленное процессами рассеяния электронов на различных объектах: примесях, фонах и др. Затухание плазмонов, вызванное этими процессами, равно  $v/2$ ,

где  $v$  – наибольшая характерная частота релаксации импульса электронов. Кроме того, необходимо, чтобы длина свободного пробега электронов в потоке превосходила глубину проникновения поверхностного плазмона.

Приведем численные оценки для гетероструктуры  $Al_x Ga_{1-x} As - GaAs - Al_x Ga_{1-x} As$  с двумерным электронным газом на границе раздела сред при  $k_0^2 \gg \frac{2m\omega_s}{\hbar}$ . При  $\Omega_s = 10^{12} \text{ c}^{-1}$ ,  $d \sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}$

$$q_x \approx 10^5 \text{ см}, \quad v_0 \sim 10^7 \text{ см}, \quad \frac{\omega_b^2}{\Omega_s^2} \approx 0,1$$

инкремент достигает величины  $0,1\Omega_s$ , что превосходит  $v \leq 10^{11} \text{ c}^{-1}$ .

## ВЫВОДЫ

1. Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа поверхностных плазмонов при их взаимодействии с потоком заряженных частиц, наведенных внешним ЭМИ и пересекающих границу раздела сред с неоднородным потенциалом. Приведено его решение, позволяющее определять влияние величины барьера на инкремент неустойчивости поверхностных колебаний; вклад в величину инкремента прошедшей и отраженной компонент потока частиц.

2. Исследованы механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с собственными электромагнитными колебаниями двумерного электронного газа, возникновение которого обусловлено наличием потенциального барьера на границе раздела сред. Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа электромагнитных колебаний такой системы, приведено выражение для инкремента их неустойчивости.

3. Определены механизмы влияния границы на взаимодействие поверхностных электромагнитных колебаний и электронов при наличии потенциального барьера. В качестве объектов исследований рассмотрены поверхностные плазмоны и собственные электромагнитные колебания двумерного электронного слоя.

4. Проведен сравнительный анализ неустойчивостей данных типов колебаний в условиях, когда взаимодействие волн и частиц носит случайный и детерминированный характер. Показано, что различия в выражениях для инкрементов связаны с изменением размеров области взаимодействия волн и частиц. Установлены различия влияния потенциального барьера на величину инкремента в случаях, когда процесс взаимодействия поверхностных плазмонов и заряженных частиц детерминирован или носит характер случайных столкновений.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стил М., Вюраль Б. Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М. ; Атомиздат – 1973. – 312 с.
- [2] Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988, 235 с.
- [3] Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М. : Радио и связь. – 1979. – 225 с.
- [4] Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – Киев.: Наукова думка. – 1991. – 216 с.
- [5] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир. – 1984. – 456 с.

Поступила 27.02.2006

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЦЕХЕ ХИМВОДОПОДГОТОВКИ ХАРЬКОВСКОЙ ТЭЦ-5

Орловский И.В.

ОАО "Харьковская ТЭЦ-5"

Украина, 62371, Харьковская обл., Дергачевский р-н, пос. Подворки

тел. (0572) 20-50-50

*Запропоновано шляхи вдосконалення системи управління витратою електричної енергії цехом хімічної підготовки Харківської ТЕЦ-5. Вони засновані на прогнозі тижневого споживання електричної енергії цехом і зменшенні періоду опиту датчиків до тижня.*

*Предложены пути совершенствования системы управления расходом электрической энергии цехом химической подготовки Харьковской ТЭЦ-5. Они основаны на прогнозе недельного потребления электрической энергии цехом и уменьшении периода опроса датчиков до недели.*

### ВВЕДЕНИЕ

Внедрение систем управления расходами энергии и воды находит широкое применение на промышленных предприятиях Украины и может быть полезно для предприятий, генерирующих энергию, с целью минимизации расходов тепловой и электрической энергии на собственные нужды.

Ранее авторами были исследованы основные закономерности формирования значений расходов электрической энергии по цеху химической водоочистки (ХВО) Харьковской ТЭЦ-5 и разработаны мероприятия по экономии электрической энергии [1]. Часть этих мероприятий направлена на повышение энергетической эффективности мощных электроприемников. Их выполнение обеспечивает снижение электропотребления за счет изменения энергетических характеристик некоторых агрегатов, входящих в состав комплекта основного оборудования цеха ХВО.

Цель данной работы заключается в разработке концепции построения системы управления расходом электрической энергии для ХВО Харьковской ТЭЦ-5. При этом в комплексе средств управления расходом электроэнергии выделены организационные, технические и программно-методические средства.

### СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Основу организационных средств управления расходом энергии составляют элементы организационно-штатных структур предприятий. В соответствии с положениями, должностными инструкциями или иными нормативными документами внутреннего пользования этим подразделениям делегированы функции управления расходами энергии. Протообразом такой структуры на Харьковской ТЭЦ-5 является группа учета, подчиненная производственно-техническому отделу (ПТО).

Основу технических средств управления расходом электроэнергии составляют счетчики, как первичные элементы учета расхода, а также все сопутствующие технические средства, участвующие в сборе, передаче и хранении данных о значении расхода электроэнергии. Для управления расходом электрической энергии система технического учета должна соответствовать следующим требованиям:

- достаточная полнота учета;
- необходимая дифференциализация учета;
- требуемая точность;
- оперативность учета;
- определенная доступность.

Вне всякого сомнения, перечисленным выше требованиям отвечает лишь та часть учета электрической энергии на Харьковской ТЭЦ-5, которая количественно отражает энергетические потоки, пересекающие границы ТЭЦ.

Сведения обо всех наличных средствах учета электрической энергии по трансформаторам и электроприемникам, обеспечивающим функционирование ХВО, приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Сведения о счетчиках электрической энергии по элементам системы электроснабжения и электроприемникам, имеющим отношение к цеху ХВО

№	Элемент или электроприемник	Счетчик	Принадлежность
1	Трансформатор 70Т	И670М	Только ХВО
2	Трансформатор 71Т	И670М	
3	Трансформатор 72Т	И670М	
4	Трансформатор 73Т	И670М	Кроме ХВО воздушные компрессоры и трансформатор электролизера
5	Трансформатор 74Т	И670М	
6	Трансформатор 75Т	И670М	
7	Нагнетатель НВЦ-1	И670М	
8	Нагнетатель НВЦ-2	Е 859/1	Датчик мощности

### АНАЛИЗ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Алгоритм расчета расхода электрической энергии за любой отчетный период времени по ХВО в кВтч может быть представлен следующим выражением:

$$W = W_{\text{ТЭ}} - 0.2W_{\text{ВК}} + W_{\text{ВД}}, \quad (1)$$

где  $W$  – суммарный расход электрической энергии трансформаторами 70Т – 75Т;  $W_{\text{ТЭ}}$  – расход электрической энергии трансформатором электролизера;  $W_{\text{ВК}}$  – расход электрической энергии воздушными компрессорами БВЦ К-1, 2 и 3, связанной с получением

сжатого воздуха высокого давления (коэффициент 0,2 учитывает долю сжатого воздуха потребителей, не имеющих отношения к цеху ХВО;  $W_{вд}$  – расход электрической энергии центробежными нагнетателями воздуха НВЦ-1 и НВЦ-2.

Исходными данными, используемыми в (1), являются показания счетчиков электрической энергии. В связи с отсутствием отдельного учета расхода электрической энергии трансформатором электролизера и воздушными компрессорами, неизвестными в выражении (1) являются  $W_{тэ}$  и  $W_{вк}$ .

Неполный учет обычно порождает упрощенные алгоритмы расчета потребления и ошибочное представление о балансе электрической энергии. Следовательно, требуемую полноту учета могут обеспечить счетчики расхода электрической энергии, потребляемой трансформаторами электролизера и воздушными компрессорами.

Целесообразно рассмотреть существующую дифференциализацию технического учета электрической энергии по цеху ХВО, включающую три условных уровня учета.

*Первый уровень* технического учета электрической энергии включает входной учет по напряжению 6 кВ. Он охватывает средства учета всех вводных фидеров на секции сборных шин трансформаторных подстанций, питающих электроприемники собственно цеха ХВО и отдельные электроприемники, включенные в технологические процессы цеха ХВО (компрессорные установки и воздушные нагнетатели). На этом уровне имеются все необходимые счетчики электрической энергии. Но этот уровень обеспечивает только основу для контроля общего расхода электрической энергии цеха ХВО, так как он не соответствует установленным границам административной и энергетической ответственности, поскольку сборные шины названных трансформаторных подстанций являются общими для электроприемников, принадлежащих различным структурным подразделениям ТЭЦ-5.

*Второй уровень* связан с учетом расхода электрической энергии напряжением 6 кВ отдельными электроприемниками. Это только две точки учета, связанные с учетом электрической энергии, расходуемой нагнетателями воздуха НВЦ-1 и НВЦ-2.

*Третий уровень* обеспечивает технический учет электрической энергии напряжением 0,4 кВ.

Среди этих уровней третий уровень учета электрической энергии на напряжении 0,4 кВ по цеху ХВО совершенно не развит. И это несмотря на то, что при этом открывается возможность контроля расходов электрической энергии агрегатами, среди которых есть весьма энергоемкие, в частности:

- насос взрыхления механических фильтров НВМФ мощностью 48,10 кВт;
- компрессор мощностью 119,30 кВт;
- насос умягченной воды НУВ мощностью 142,40 кВт;
- насос подпитки светленной водой теплосети НОВТ мощностью 151,30 кВт.

Измерения показали, что суммарная электрическая мощность электроприемников напряжением

0,4 кВ, участвующих в обеспечении технологического процесса цеха ХВО, составляет примерно 700 кВт.

Обобщенные данные о наличии счетчиков электрической энергии уровням учета представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Сведения о распределении точек учета электрической энергии по условным уровням учета для цеха ХВО

Уровень	Характеристика уровня	Количество точек учета (счетчиков)		
		имеется	требуется	всего
1	на напряжение 6 кВ для трансформаторов силовых (70Т, 71Т, 72Т, 73Т, 74Т, 75Т)	6	0	6
2	на напряжение 6 кВ для нагнетателей воздуха НВЦ-1, НВЦ-2	2	0	2
3	на напряжение 0,4 кВ для приемников, принадлежащих разным структурным подразделениям и запитанным через один и тот же силовой трансформатор	2	13	15
ИТОГО		10	13	23

Перечень дополнительных счетчиков электрической энергии для электроприемников напряжением 0,4 кВ приведен в табл. 3.

Таблица 3  
Дополнительные счетчики электрической энергии напряжением 0,4 кВ (трансформатор тока 200/5 А)

№	Наименование электроприемника	Мощность, кВт	Место установки
1	Насос умягченной воды НУВ 1	118	71Т, РУ-0,4 кВ
2	НУВ-2		72Т, РУ-0,4 кВ
3	НУВ-3		73Т, РУ-0,4 кВ
4	НУВ-4		74Т, РУ-0,4 кВ
5	Насос осветленной воды подпитки ТС НОВТ-1	113	73Т, РУ-0,4 кВ
6	НОВТ-2		74Т, РУ-0,4 кВ
7	НОВТ-3		74Т, РУ-0,4 кВ
8	НОВТ-4		74Т, РУ-0,4 кВ
9	Компрессор воздушный К-1	118	73Т, РУ-0,4 кВ
10	К-2		74Т, РУ-0,4 кВ
11	К-3		75Т, РУ-0,4 кВ
12	Трансформатор электролизера Т1	110	73Т, РУ-0,4 кВ
13	Т2		75Т, РУ-0,4 кВ

Оперативность технического учета неудовлетворительная из-за низкой частоты опросов. Наличие ежемесячных показаний расхода электрической энергии по тем же трансформаторам 70Т – 75Т недостаточно для управления расходом электрической энергии

гии, так как причина перерасхода электрической энергии, как правило, не может быть выяснена при таком запаздывании информации о расходах электрической энергии.

Наконец, доступ к данным учета электрической энергии должна быть разрешен персоналу, использующему электроприемники цеха ХВО.

В настоящее время система технического учета электрической энергии ТЭЦ-5 приводится в полное соответствие всем вышеперечисленным требованиям.

В комплексе средств управления расходом электрической энергии по ХВО решающая роль, вне всякого сомнения, принадлежит программно-методическим средствам, составляющим основу системы контроля и нормализации (КиН) [2].

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Использование математического аппарата прикладной статистики [3] в полной мере обеспечивает контроль и планирование расхода электрической энергии для цеха ХВО. Для этого пригодны регрессионные зависимости расхода электрической энергии от подачи воды на подпитку тепловой сети. При описании зависимостей расхода электрической энергии отдельными электроприемниками, обеспечивающими работу цеха ХВО, могут быть использованы и другие параметры.

На рис. 1 представлена зависимость расхода электрической энергии на подготовку осветленной воды для подпитки тепловой сети за 2,5 месяца 2004 г. при недельном периоде контроля.

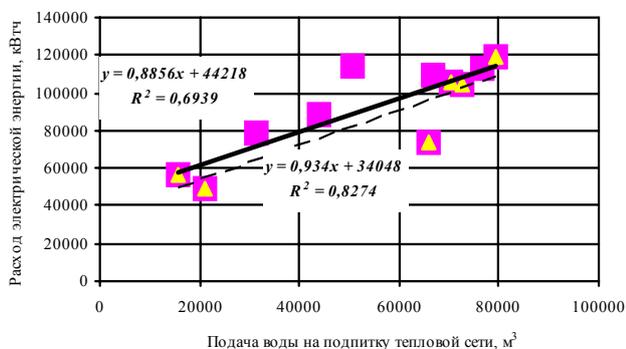


Рис. 1. Зависимость недельного расхода электрической энергии на подготовку осветленной воды для подпитки тепловой от недельной подачи осветленной воды

Как видно на рис. 1, зависимость недельного расхода электрической энергии (сплошная линия) на подготовку и подачу осветленной воды для подпитки тепловой сети  $y$  (кВт·ч) от подачи осветленной воды  $x$  (м³) описывается уравнением

$$y = 0,856x + 44218 \quad (2)$$

Уравнение (2) получено при высокой величине коэффициента аппроксимации ( $R^2=0,6939$ ).

Наименьший разброс математического ожидания недельного расхода электрической энергии на подготовку и подачу осветленной воды соответствует диапазону недельных подач 7000 – 8000 м³.

Приведенная зависимость (1) полностью соответствует требованиям, предъявляемым к стандартным зависимостям, используемым в системе КиН, и может быть использована для нормализации расходов электрической энергии по цеху ХВО.

При применении системы КиН в цехе ХВО в условиях недельного контроля расхода электрической энергии на подготовку и подачу осветленной воды, получена следующая аппроксимированная линейная зависимость:

$$y = 0,934x + 34048 \quad (3)$$

На рис. 1 график зависимости (3) построен пунктирной линией.

Сравнение кривых показывает, что при использовании системы КиН аппроксимация дает лучший результат. При недельной подаче 75000 м³ осветленной воды переход от расходов энергии в соответствии с зависимостью (2) к зависимости (3) обеспечивает снижение потребления с 110638 кВт·ч до 104098 кВт·ч, т.е. экономию 6540 кВт·ч.

Управление расходом электрической энергии по структурным подразделениям требует наличия стандартных зависимостей не только для структурного подразделения, но и для его отдельных энергоемких агрегатов. Среди энергоемкого оборудования, обслуживающего нужды цеха ХВО, присутствуют источники воздуха низкого (0,24 МПа) и высокого давления (0,6 МПа).

Источниками сжатого воздуха низкого давления являются нагнетатели воздушные центробежные, один из которых работает по заявкам дежурной смены со щита управления цеха ХВО, а другой находится в резерве. Весь воздух низкого давления используется на нужды цеха ХВО и другим потребителям ТЭЦ не поставляется.

Центробежные нагнетатели НВЦ-1 и НВЦ-2 являются самыми мощными электроприемниками, обслуживающими потребности цеха ХВО. По результатам проведенных испытаний установлена средняя мощность, потребляемая нагнетателем из сети, которая составляет 540 кВт·ч.

Сжатый воздух высокого давления на ТЭЦ-5 подается воздушными компрессорными установками винтового и поршневого типов. Цех ХВО использует только около 80% выработанного сжатого воздуха высокого давления. Остальной расход приходится на ремонтные распределительные сети сжатого воздуха. Как показывают наблюдения, типичная ситуация связана с круглосуточным использованием не менее одного из компрессоров. Предпочтение при этом отдается использованию винтового компрессора, что оправдано со всех точек зрения.

На рис. 2 показана зависимость недельного расхода электрической энергии на получение сжатого воздуха низкого давления  $y$  (кВт·ч) от подачи осветленной воды на подпитку тепловой сети за неделю  $x$  (м³), описываемая линейным уравнением

$$y = 0,4852x + 791,83 \quad (4)$$

Коэффициент корреляции для зависимости, отражающей изменение расхода электрической энергии

центробежным нагнетателем, невысок ( $R^2=0,4855$ ), что объясняется наличием человеческого фактора – требуемое время работы нагнетателя определяется субъективно.

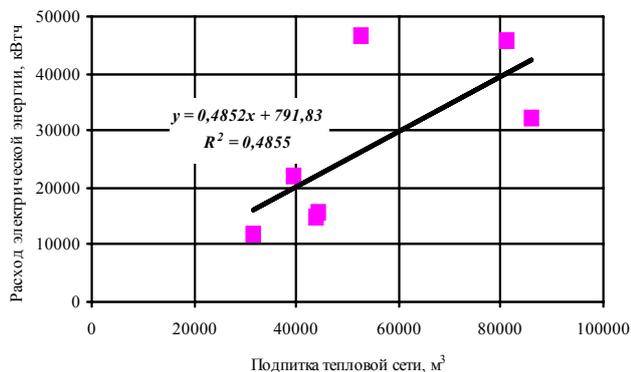


Рис. 2. Зависимость недельного расхода электрической энергии центробежным воздушным нагнетателем НВЦ - 360-22-1 от подачи осветленной воды на подпитку тепловой сети за неделю

Использование зависимости на рис. 2 в качестве стандартной для контроля и нормализации расхода электрической энергии на получение сжатого воздуха низкого давления позволяет решить две задачи:

- упорядочить использование НВЦ в соответствии с обнаруженными закономерностями (см. рис. 2).
- экономить электрическую энергию за счет исключения случаев необоснованного увеличения времени работы центробежных нагнетателей воздуха.

На рис. 3 показана зависимость недельного расхода электрической энергии на получение сжатого воздуха высокого давления на воздушных компрессорах  $y$  от подачи осветленной воды на подпитку тепловой сети за неделю  $x$ , описываемая линейным уравнением:

$$y = 0,0688x + 15369. \quad (5)$$

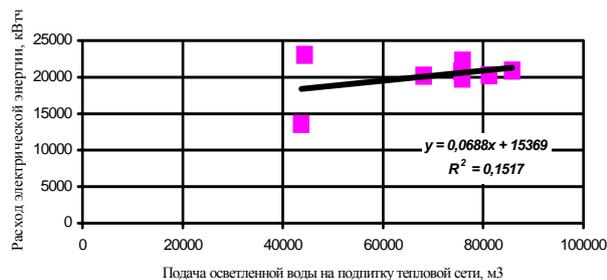


Рис. 3. Зависимость недельного расхода электрической энергии воздушными компрессорами от подачи осветленной воды на подпитку тепловой сети за неделю

Согласно (5) недельный расход электрической энергии компрессорными установками во многом определяется высокой постоянной составляющей расхода электрической энергии и существенно меньше зависит от изменения подач осветленной воды за неделю. Это подтверждается тем, что зависимость недельного расхода электрической энергии для получения сжатого воздуха высокого давления имеет невысокое значение коэффициента аппроксимации ( $R^2=0,1517$ ). Основные причины этого – наличие не-

контролируемого расхода сжатого воздуха высокого давления на ремонтные нужды и большое число утечек сжатого воздуха из распределительной сети. И то и другое выступают в роли дополнительных факторов, влияющих на формирование расходов электрической энергии на получение сжатого воздуха высокого давления. Наличие неопределенности в количественной оценке расхода сжатого воздуха для ремонта делает неэффективным использование системы КиН для снижения этих расходов для цеха ХВО до установки счетчиков.

Неучтенным расходом воздуха высокого давления через ремонтную распределительную сеть можно объяснить наличие разбросов расходов электрической энергии по воздушным компрессорам (рис. 3). Так, при недельной подаче 43661 м³ осветленной воды в одном случае недельный расход электрической энергии составил 13596 кВт·ч электрической энергии, а в другом случае при подаче 44312 м³ осветленной воды за неделю недельный расход электрической энергии составил уже 23027 кВт·ч.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены пути совершенствования системы технического учета электрической энергии в цехе химводоочистки Харьковской ТЭЦ-5. Установлено, что среди средств управления расходом электрической энергии важнейшую роль играют программно-методические средства, составляющим основу системы.

2. На основе экспериментальных данных получены регрессионные зависимости прогноза расхода электрической энергии для цеха химводоочистки.

3. Обоснована целесообразность применения недельного периода в системе контроля и нормирования расхода электрической энергии для цеха химводоочистки. В сочетании с прогнозированием а система технического учета снизить недельный расход электроэнергии на собственные нужды цеха химводоочистки ТЭЦ-5.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вороновский Г.К., Покалицын С.Н., Орловский И.В. Потенциал экономии электрической энергии цеха химводоочистки Харьковской ТЭЦ-5 // *Электротехника і електромеханіка.* – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 2. – С. 93-97.
- [2] Праховник А.В., Трапп Г. Р. Контроль и нормализация электропотребления. Управление энергоиспользованием // Сб. докладов. – К.: Альянс за сбережение энергии. – 2001.
- [3] Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.. Курс теории вероятности и математической статистики. – М.: Наука, 1969.

Поступила 25.01.2006

## ТЯГОВА АСИНХРОННА ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧА МЕТРОВАГОНА ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Хворост М.В., к.т.н., доц.  
ДП "Харківський метрополітен"  
Україна, 61012, Харків, вул. Енгельса, 29  
тел. (0572) 730-35-96

*Запропонована структура тягової асинхронної електропередачі метровагона потужністю 1000 кВт дозволяюча при напрузі живлення 1500 В реалізувати концентровану систему тяги п'ятивагонних метропоїздів по схемі "два головні обмоторені вагони з кабінами управління в голові і хвості поїзда та три причепні вагони в середині". Показано, що к.к.д. запропонованої тягової асинхронної електропередачі навіть при використанні вузлів захисту від струмів короткого замикання тягових двигунів при відмовах в інверторі напруги буде не нижче за 0,92 при частоті широтно-імпульсної модуляції інвертора 3 кГц.*

*Предложена структура тяговой асинхронной электропередачи метро вагона мощностью 1000 кВт позволяющая при напряжении питания 1500 В реализовать смешанную систему тяги пятивагонных метро поездов по схеме "два головных обмоторенных вагона с кабинами управления в голове и хвосте поезда и три прицепных вагона в середине". Показано, что к.п.д. предложенной тяговой асинхронной электропередачи даже при использовании узлов защиты от токов короткого замыкания тяговых двигателей при отказах в инвертировании напряжения будет не ниже 0,92 при частоте широтно-импульсной модуляции инвертирования 3 кГц.*

### АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз робіт [1, 2] показує, що в якості показників технічної досконалості метропоїздів щодо енергетичних, матеріальних і трудових втрат в процесі експлуатації можуть бути прийняті:

- величина максимально допустимої швидкості  $V_{\max}$  і ступінь її реалізації  $K_V = V_{\text{ср}}/V_{\max}$  (де  $V_{\text{ср}}$  – середня швидкість) в циклі руху "пуск – вибіг – гальмування";
- коефіцієнт корисного використання енергії гальмування  $K_{\text{рек}} = A_p/A_{\text{ТК}}$  (де  $A_{\text{ТК}}$  – кінетична енергія метропоїзда на момент початку гальмування;  $A_p$  – рекуперуєма у тягову мережу електроенергія);
- коефіцієнт корисної дії  $\eta_M = A_{\text{ПК}}/A_{\text{ТС}}$  (де  $A_{\text{ТС}}$  – енергія, споживаєма метропоїздом з тягової мережі на циклі руху "пуск – вибіг – гальмування";  $A_{\text{ПК}}$  – кінетична енергія метропоїзда на кінець пуску);
- відносна кількість обмоторених метровагонів

$$K_M = \frac{N_{\text{вМ}}}{N_{\text{в}}} \quad (\text{де } N_{\text{в}} - \text{загальна кількість вагонів у складі метропоїзда; } N_{\text{вМ}} - \text{кількість обмоторених вагонів у складі метропоїзда);$$

- клас експлуатаційної надійності метропоїзда, який пов'язаний з кількістю відмов метровагонів на лінії за термін їх служби.

Показники  $K_V$ ,  $K_{\text{рек}}$ ,  $\eta_M$ , як правило, визначають експериментально, тобто при реалізації циклу руху метропоїзда "пуск – вибіг – гальмування" на еквівалентному перегоні у вигляді площадки з максимально допустимим пасажиронавантаженням метровагонів та при максимально допустимих величині швидкості  $V_{\max}$  на кінець пуску і величині прискорення  $a_{\text{П}}^+$  на інтервалі пуску і уповільнення  $a_{\text{Г}}^-$  на інтервалі гальмування. Однак, на стадії розробки нового типу метропоїздів доцільно оцінити ці показники з боку технічної досконалості окремих систем і вузлів.

Очевидно, що в ідеальному випадку при реалізації на еквівалентному перегоні в 1670 м [3] в циклі руху метропоїзда "пуск – вибіг – гальмування" на кінець інтервалу пуску максимально допустимої швидкості  $V_{\max} = 90$  км/год при постійній величині максимально допустимого з точки зору комфортності пасажирів прискорення  $a_{\text{П}}^+ = 1,6$  м/с<sup>2</sup> і уповільнення на інтервалах вибігу і гальмування відповідно  $a_{\text{В}}^- = 0,0917$  м/с<sup>2</sup> і  $a_{\text{Г}}^- = 1,6$  м/с<sup>2</sup> [1] середня швидкість становить  $V_{\text{ср}} \cong 69$  км/год, що дає  $K_V \cong 0,766$ .

Коефіцієнт  $K_{\text{рек}}$  і  $\eta_M$  в ідеальному випадку наближаються до 1.

Щодо кількості обмоторених метровагонів та класу експлуатаційної надійності метропоїзда, то можна прийняти, що ці показники у ідеальному випадку п'ятивагонного метропоїзда з двома головними обмотореними вагонами в голові і хвості відповідають  $K_M = 40$  % і абсолютному класу, тобто не більше однієї відмови метровагона на лінії за нормативний термін служби до його капітального ремонту при прийнятій системі технічного обслуговування і ремонту.

При прийнятій для вітчизняних метрополітенів моторвагоній тязі ( $K_M = 100$  %) технічні показники метропоїздів навіть на базі вагонів 81.717 (головних) і 81.718 (проміжних) з тяговою електропередачею постійного струму в якій реалізується двозонна характеристика управління тяговими двигунами постійного струму послідовного збудження від тиристорно-імпульсної системи керування є далекими від ідеальних технічних показників.

Так, при максимально реалізуємій швидкості в кінці пуску  $V_{\max} = 82,3$  км/год, коефіцієнти технічної ефективності складають:  $K_V \cong 0,578$ ;  $K_{\text{рек}} \cong 0,42$  при схемному к.к.д. рекуперації  $\eta_{\text{Г}} = 0,48$ ;  $\eta_M \cong 0,85$  при к.к.д. тягової електропередачі  $\eta_{\text{ТЕП}} = 0,86$ . Практика ж експлуатації таких метропо-

їздів на Олексіївській лінії ДП "Харківський метрополітен" показує, що по своїй експлуатаційній надійності метропоїзди на основі метровагонів 81.717 і 81.718 відповідають лише відносному класу. Далекими від ідеальних технічних показників є і п'ятивагонні метропоїзди розподіленої системи тяги  $K_M = 60\%$ , Паризького метрополітену, три обмоторені вагони яких мають мономоторні візки з тяговими двигунами постійного струму підвищеної потужності [1].

Суттєвого покращення технічних показників (за виключенням  $K_M$  та  $K_{рек}$ ) метропоїздів з моторвагонною тягою було досягнуто ще на кінець 80-х років ХХ-го століття за рахунок використання в якості тягових двигунів метровагонів трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, кращі зразки яких мають масу віднесено до їх потужності на рівні 1,6 кг/кВт [4]. Так, фірма "Стремберг" (Фінляндія) розробила тягову асинхронну електропередачу на основі інвертора напруги для метровагонів серії 100 яка дозволила при розгоні метропоїзда з моторвагонною тягою до швидкості 80 км/год реалізувати середнє прискорення на рівні 0,888 м/с<sup>2</sup>, що дозволяє скоротити час розгону до 2,5 с, а при гальмуванні, починаючи із швидкості 62 км/год реалізувати постійне уповільнення на рівні 1,2 м/с<sup>2</sup> [1].

Відмітимо, що в режимах пуску і гальмування цих метропоїздів з тяговою асинхронною електропередачею регулювання потужності тягових асинхронних двигунів виконується аналогічно регулюванню потужності двигунів метровагонів з електропередачею постійного струму, тобто з використанням двозонної характеристики управління двигунами.

Структура класичної силової схеми тягової асинхронної електропередачі метровагона метровагона, яка реалізує групове управління тяговими асинхронними двигунами, має вигляд, наведений на рис. 1.

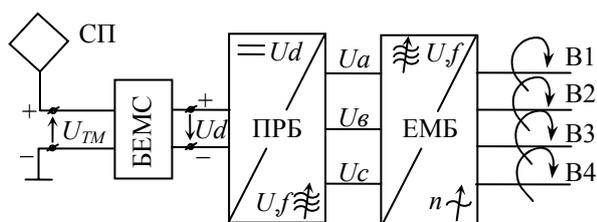


Рис. 1. Структура силової схеми тягової асинхронної електропередачі метровагона з груповим управлінням двигунами: БЕМС – блок електромагнітної сумісності; ПРБ – перетворювально-регулювочний блок; ЕМБ – електромеханічний блок; B1 – B4 – вали чотирьох тягових асинхронних двигунів;  $U_{TM}$  – напруга в тяговій мережі;  $U_d$  – напруга живлення ПРБ; СП – струмоприймач метровагона

В традиційному варіанті використання двозонної характеристики управління тяговими асинхронними двигунами у класичній структурі тягової асинхронної електропередачі метровагона на базі автономного інвертора напруги електромеханічний блок (ЕМБ), забезпечуючий перетворення регульованої по величині і частоті змінної трифазної напруги  $U, f$  в регулюванні обороти  $n$  валів асинхронних двигунів, пред-

ставляє собою паралельне з'єднання чотирьох тягових двигунів з загальними фазними резисторами для погодження потужності (напруги) двигунів в режимі гальмування при високих швидкостях з потужністю (напругою) загального для всіх двигунів перетворювально-регулювочного блока (ПРБ). Фазні резистори при низьких швидкостях гальмування та в режимі тяги шунтуються контакторами.

Перетворювально-регулювочний блок (ПРБ) представляє собою трифазний мостовий комутатор інвертора напруги на двофазних напівпровідникових ключах знакозмінного струму із снаберами фіксації рівня напруги на керованих вентилях [3]. Блок електромагнітної сумісності (БЕМС) представляє собою, як правило, сукупність двох вузлів: вхідного LC-фільтра для придушення вищих гармонік струму і напруги на вході ПРБ і, отже, для обмеження пульсацій тягового струму та наданні тяговій мережі властивостей джерела напруги і регулятора реостатного гальма для забезпечення режиму електричного гальмування при відсутності в тяговій мережі споживачів або напруги на струмоприймачі (наприклад, при переїзді розривів контактного рельса). Однак, треба мати на увазі, що в тягових асинхронних електропередачах з двозонною характеристикою управління двигунами метровагонів, асинхронні тягові двигуни виконуються далекими від теоретично можливих масо-габаритних характеристик із-за необхідності забезпечувати їх роботу в режимі глибокого ослаблення магнітного поля, а також із-за того, що для реалізації найбільш допустимої гальмової сили у діапазоні високих швидкостей ( $V > 30 - 40$  км/год), тягові асинхронні двигуни повинні працювати з підвищеною напругою і ввімкненими фазними резисторами. Крім цього для обмеження фазних струмів короткого замикання при відмовах в інверторі напруги типу "пробиття" ключа тягові асинхронні двигуни метровагонів виконуються з великою індуктивністю розсіювання обмоток.

Ці чинники, а також порівняно низький рівень напруги живлення, який обумовлює при збільшенні потужності значні втрати в тяговому електрообладнанні метровагона, і, що особливо небажано, збільшення втрат потужності в комутаторі інвертора напруги з традиційною "жорсткою" комутацією силових напівпровідникових ключів, а також високі вимоги щодо допустимих пульсацій струму в тяговій мережі і не дозволяють суттєво підняти потужність тягової асинхронної електропередачі із-за обмежень як з боку масо-габаритних параметрів електрообладнання, так і з боку спроможності традиційної системи його охолодження, прийнятої у метровагонобудуванні і тим самим робить неможливим перехід на концентровану або розподілену систему тяги метропоїздів.

Реалізація ж прийнятих для практики використання концентрованої системи тяги метропоїздів масо-габаритних і енергетичних показників тягового електрообладнання метровагонів підвищеної потужності потребує нетрадиційних підходів до побудови силових схем блоків тягової асинхронної електропередачі, вибору величини напруги живлення та характеристики управління тяговими двигунами. Такими нетрадиційними підходами є перехід:

- на підвищену напругу тягової мережі, а саме напругу 1500 В, яка вже широко використовується на лініях зарубіжних метрополітенів [1];
- на однозонну характеристику управління тяговими асинхронними двигунами, що саме по собі дає можливість покращити масо-габаритні показники тягових асинхронних двигунів [6];
- на групове управління тяговими асинхронними двигунами обмотованого метровагона з реалізацією схемного захисту від ударних гальмових моментів [7, 8], що також сприяє покращенню масо-габаритних показників як тягових асинхронних двигунів із-за зняття обмежень на індуктивність розсіювання обмоток, так і перетворювально-регулювального блока;
- на "м'яку" комутацію силових напівпровідникових ключів комутатора інвертора напруги [9], що зменшить втрати потужності в цих ключах і, отже, дозволить підняти потужність і частоту широтно-імпульсної модуляції інвертора напруги;
- на гібридну структуру вхідного LC-фільтра блока електромагнітної сумісності, що дозволить як покращити масо-габаритні показники фільтра, так і знизити пульсації струму в тяговій мережі [10].

Над вирішенням цих задач і працює автор під керівництвом проф., д.т.н. Панасенко М.В. Далі будуть наведені деякі результати схематичних розробок в напрямку вирішення вище наведених задач.

### СИЛОВІ СХЕМИ БЛОКІВ ТЯГОВОЇ АСИНХРОННОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

По-перше, відмітимо, що ні від прийнятої системи тяги, ні від величини напруги в тяговій мережі структури тягових асинхронних електропередач моторних метровагонів не залежать. Ці чинники впливають тільки на параметри елементів силових схем блоків тягової електропередачі метровагона.

На структури силових схем блоків тягової асинхронної електропередачі (БЕМС, ПРБ, ЕМБ) відповідно впливають який тип управління, прийнятий у тяговій асинхронній електропередачі (груповий, повізковий, індивідуальний), прийнятий тип активного фільтра (послідовний чи паралельний) при реалізації гібридної структури вхідного LC-фільтра, вид комутації (жорстка чи м'яка) двоквADRантних ключів комутатора інвертора напруги та вид характеристики управління, засіб захисту і структура силових чотириквADRантних ключів вузлів захисту від струмів короткого замикання (ударних гальмових моментів) тягових асинхронних двигунів.

На рис. 2, а наведена найбільш доцільна з точки зору простоти, установленої потужності і втрат потужності силова схема електромагнітного блока ЕМБ метровагона при реалізації групового управління тяговими асинхронними двигунами з використанням загальних фазних вузлів захисту від струмів короткого замикання двигунів при відмовах в ПРБ та тиристорною структурою чотириквADRантних ключів цих вузлів захисту.

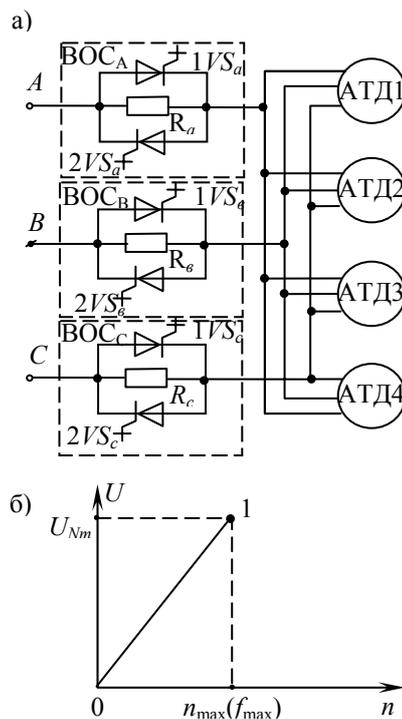


Рис. 2 Силова схема ЕМБ метровагона при груповому управлінні тяговими асинхронними двигунами (АТД1 – АТД4) і загальними фазними вузлами захисту від струмів короткого замикання двигунів (ВОС<sub>А</sub>, ВОС<sub>В</sub>, ВОС<sub>С</sub>) – а); вид однозонної характеристики управління тяговими асинхронними двигунами в межах від нуля (точка 0) до максимально допустимих оборотів ротора (точка  $n_{\max}$ ) – б)

При використанні однозонної характеристики управління (рис. 2, б) в зоні регульованих оборотів ( $0 - n_{\max}$ ) і, отже, регульованої напруги  $U$  і частоти  $f$  виконується умова:

$$\frac{U}{f} = const. \quad (1)$$

При цій умові в тягових двигунах буде підтримуватися постійний (максимальний) магнітний потік, що і дозволяє в процесі розгону до  $t_{\max}$  реалізувати максимальний пусковий момент, тобто постійне максимально допустиме прискорення метровагона. Потужність же тягової асинхронної електропередачі в процесі пуску поступово збільшується від нуля до свого максимального значення  $P_{\max}$  на момент досягнення максимально допустимої швидкості  $V_{\max}$  в кінці пуску (точка 1 на рис. 2, б). Максимального значення у цей момент досягають фазна величина напруги  $U=U_{Nm}$  і її частота  $f=f_{\max}$ . Отже, реалізація однозонної характеристики управління тяговими асинхронними двигунами метровагона (рис. 2, б) не потребує при реалізації максимально допустимого уповільнення погодження потужності (напруги) тягових асинхронних двигунів і перетворювально-регулювального блока при гальмуванні з максимальної швидкості  $V_{\max}$ . Це дозволяє відмовитися від підключення погоджувальних фазних резисторів при реалізації електричного гальмування, що потребує в схемі рис. 2, а постійного характеру включення чотириквADRантних ключів  $1VS_i, 2VS_i$  (де  $i = a, b, c$ ) вузлів захисту ВОС<sub>і</sub>

як в режимі пуску, так і в режимі гальмування. Останнє і дає можливість реалізації чисто рекупера- тивного гальмування при використанні однозонної характеристики управління тяговими двигунами у всьому діапазоні швидкостей метровагона і, отже дозволяє суттєво збільшити схемний к.к.д. рекуперації  $\eta_p$ , що і наближує коефіцієнт корисного використання енергії гальмування до 1.

Крім цього позитивного чинника, однозонна ха- рактеристика управління тяговими двигунами дає можливість суттєво скоротити інтервал розгону до максимальної швидкості  $V_{max}$  і, отже, підвищити сере- дню швидкість  $V_{cp}$  на перегоні, що в свою чергу сте- пінть реалізації максимально допустимої швидкості  $K_V$  наближає до 0,766.

Вузли обмеження струму короткого замикання  $ВОС_i$  ( $i=a, в, с$ ) включаються в роботу (до тягових асинхронних двигунів підключаються фазні резистори  $R_i$  ( $i = a, в, с$ )) тільки при відмовах ключів (типу "пробиття") в ПРБ шляхом вимикання чотириквadraнтних ключів  $1/S_i, 2/S_i$  (де  $i = a, в, с$ ). Тепер у зв'язку із зняттям обмежень для тягових асинхронних двигунів з боку двозонної характеристики управління та ін- дуктивності розсіювання асинхронні тягові двигуни для метровагонів можна проектувати з оптималь- ним з точки зору їх масо-габаритних показників. Це і дозволить вписати в габарити візка асинхронні тягові двигуни пускової потужності 250–300 кВт, що буде, достатнім для переходу на змішану структуру тяги п'ятивагонних метропоїздів навіть з двома типами метровагонів: двох головних обмоторених з кабінами управління і трьох причепних необмоторених. А це і дозволить реалізувати відносно кількість обмото- рених метровагонів  $K_V$  у складі п'ятивагонного метро- поїзда на рівні 40% і отже, зменшити експлуатаційні втрати на технічне обслуговування і ремонт метропої- здів. Щодо впливу однозонної характеристики управ- ління тяговими асинхронними двигунами при їх гру- повому керуванні від одного перетворювально- регульованого блока на частоту вихідної напруги, потужність двигунів і допустиме відхилення діаметрів колес, то перехід з двозонної характеристики до одно- зонної потребує підвищення частоти модульованої вихідної напруги для реалізації  $V_{max}$  приблизно вдвічі, а це у сукупності із скороченням робочого інтервалу на циклі "пуск – вибіг – гальмування" дає зменшення установленої потужності двигунів майже в 1,4 рази [6], а також дає, при однакових величинах відхилень по струму в 10%, збільшення допустимого відхилення діаметрів колес в 1,6 рази [11].

Втрати потужності у фазних вузлах обмеження струмів короткого замикання тягових асинхронних двигунів при потужності тягової електропередачі ме- тровагона 1000 кВт і при напрузі в тяговій мережі 1500 В складають близько 9 кВт, що при коефіцієнті корисної дії оптимізованих під однозонну характе- ристику тягових асинхронних двигунів  $\eta \cong 0,96$  дає ко- ефіцієнт корисної дії ЕМБ метровагона на рівні  $\eta_{ЕМБ}=0,95$ .

На рис. 3 наведена силова схема перетворюваль- но-регульовочного блока (ПРБ) на базі трифазного

мостового інвертора напруги з силовими двоквadraнт- ними ключами знакозмінного струму на основі мо- дулів IGBT і вузлів однорідної комутації, забезпечу- ючих "м'яку" комутацію ключів.

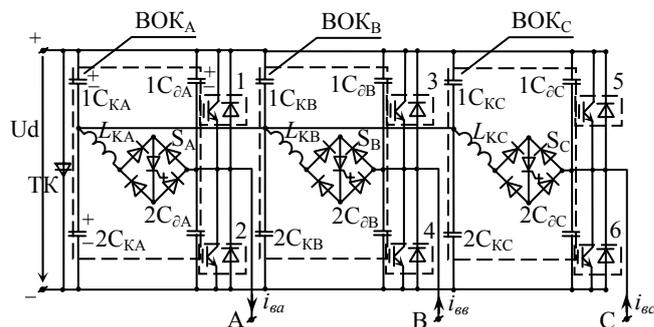


Рис. 3. Силова схема перетворювально-регульовочного блока (ПРБ) метровагона: 1–6 – двоквadraнтні ключі знакозмінного струму; ВОК<sub>A</sub>, ВОК<sub>B</sub>, ВОК<sub>C</sub> – вузли однорідної комутації ( $L_k$  – комутуючий дросель;  $1C_k, 2C_k$  – комутуючі конденсатори;  $1C_{\delta}, 2C_{\delta}$  – снаберні конденсатори; S – чотириквadraнтний ключ); ТК – тиристорний короткозамикач для захисту ключів 1–6 від струмів короткого замикання і перенапруги з боку джерела живлення Ud

Регулювання вихідної напруги по величині і час- тоті виконується в схемі рис.3 класичним способом з використанням двополярної синусоїдальної широтно- імпульсної модуляції (ШІМ) шляхом перемикань си- лових ключів 1–6 комутатора інвертора напруги. Од- нак, на відміну від традиційної "жорсткої" комутації (комутації при напрузі) транзисторів ключів 1–6 в безснаберних схемах або схемах із снаберами фіксації напруги, комутація їх в схемі рис. 3 при ввімкненні і вимиканні на періоді ШІМ забезпечується вузлами однорідної комутації (ВОК<sub>A</sub>, ВОК<sub>B</sub>, ВОК<sub>C</sub>) "м'якою", тобто при нульовій напрузі на них.

Комутація двоквadraнтних ключів знакозмінного струму при напрузі на них ("жорстка" комутація) при- водить до значних додаткових комутаційних втрат потужності всіх лінійних керованих венилях, які при напрузі більш за 1500 В на частотах ШІМ 2÷3 кГц стають вже неприйнятними з точки зору тепловиде- лень в модулях [5, 13].

Нульова напруга при ввімкненні транзисторів за- безпечується за рахунок попереднього (перед самим моментом їх ввімкнення) розряду їх снаберних кон- денсаторів  $C_{\delta}$  у вузлах однорідної комутації збитко- вим струмом  $\Delta i = i_k - i_g$  (де  $i_k$  – струм комутуючого дроселя  $L_k$  на момент вимикання противофазного ключа;  $i_g$  – поточне значення фазного струму), який формується ВОК при ввімкненні чотириквadraнтного ключа S. Розряджений снаберний конденсатор  $C_{\delta}$  за- безпечує нульову напругу і при вимиканні цього тран- зистора. При вимиканні транзисторів снаберні кон- денсатори  $C_{\delta}$  накопичують енергію, яка перед сліду- ючим ввімкненням транзистора передається джерелу живлення. Отже, наявність снаберних конденсаторів у схемі рис. 3 практично не приводить до додаткових втрат потужності, як це мало би місце при викорис- танні класичних РСД – снаберів [5].

Ввімкнення і вимикання транзисторів ключів при нульовій напрузі на них і забезпечує практично нульові комутаційні втрати потужності в ключах схеми рис. 3. Це і дозволяє збільшити струмове навантаження модулів IGBT у порівнянні з їх використанням в схемах з "жорсткою" комутацією.

Крім цього позитивного чинника, при використанні "м'якої" комутації в схемі рис. 3 вирішується і задача обмеження крутизни фронтів імпульсів вихідної напруги інвертора з ШІМ, що забезпечує комфортний режим для ізоляції з'єднувальних кабелів і статорних обмоток асинхронних тягових двигунів. Якщо ж цю задачу вирішити у безнаберних схемах інверторів з ШІМ, то це потребує установки на виході інвертора додаткових RLC-фільтрів [12].

Щодо комутаційного інтервалу вузла однорідної комутації  $t_k$  і степені його впливу на діапазон регулювання при ШІМ, установлену потужність елементів ВОК і втрати потужності в них, то тут треба відмітити наступне.

При частотах ШІМ порядку  $2 \div 3$  кГц тривалість комутаційного інтервалу вибирають із умови

$$t_k \leq 0,1T_M, \quad (2)$$

де  $T_M = 1/f_M$  – період частоти модуляції.

При виконанні умови (2) зниження діапазону регулювання буде в межах 10% у порівнянні з діапазоном регулювання на цих же частотах у схемі трифазного інвертора з "жорсткою" комутацією ключів. Установлена потужність і втрати потужності в елементах вузлів однорідної комутації ( $L_k, C_k, C_\phi, S$ ) із-за малих величин діючих і середніх значень струму  $i_k$  та часу  $t_k$  будуть незначними у порівнянні з установленою потужністю і втратами потужності у основному комутаторі інвертора.

Результатами розрахунку втрат потужності у перетворювально-регулювальному блоці на базі IGBT-модулів SM600HC-66H (по два в паралель) тягової асинхронної електропередачі (рис. 3) метровагона потужністю  $P_H = 1000$  кВт, напрузі живлення  $U_{TM}=1500$  В, вихідної частоти  $f=100$  Гц, частоти ШІМ  $f_M = 3$  кГц, тривалості фронтів  $t_{\phi}=5$  мкс, тривалості комутаційного інтервалу на періоді ШІМ  $t_k = 33$  мкс та навантаженні з  $\cos\phi = 0,8$  наведені у таблиці.

Таблиця

Втрати потужності комутатора (12 модулів)	Втрати потужності у модулі	Втрати потужності в ключі	Втрати потужності в 3-х ВОК	Втрати потужності у ВОК	Сумарні втрати потужності в ПРБ
$\Delta P_k$ (Вт)	$\Delta P_M$ (Вт)	$\Delta P_{кл}$ (Вт)	$\Delta P_{\Sigma ВОК}$ (Вт)	$\Delta P_{ВОК}$ (Вт)	$\Delta P_{ПРБ}$ (Вт)
7556	613	1226	1418	472	8024

Таким чином, коефіцієнт корисної дії перетворювально-регулювально-регулювального блоку на базі трифазного мостового інвертора напруги з "м'якою" комутацією силових ключів на основі паралельного з'єднання двох IGBT-модулів типу SM800HC-66H фірми Mit-

subishi для тягової асинхронної електропередачі метровагона потужністю 1000 кВт складає 0,991.

Силовa схема блока електромагнітної сумісності (БЕМС) з гібридним фільтром для тягової асинхронної електропередачі метровагона наведена на рис. 4.

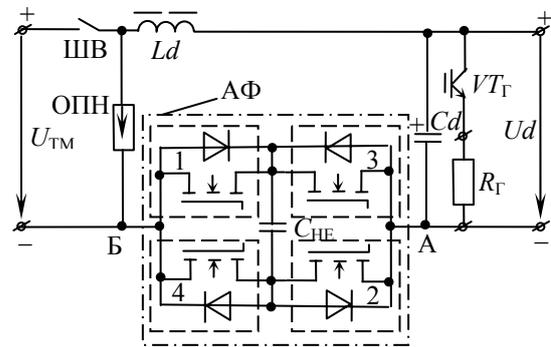


Рис. 4. Силовa схема блока електромагнітної сумісності (БЕМС) метровагона: ШВ – швидкодіючий вимикач; ОПН – обмежувач перенапруг на вході;  $LdCd$  – пасивний LC-фільтр; АФ – активний фільтр (1÷4 – двоквADRANTні ключі знакозмінного струму на польових транзисторах,  $C_{HE}$  – накопичувач енергії);  $VT_G, R_G$  – реостатний гальм

Перш за все треба відмітити, що для нормальної роботи інвертора напруги перетворювально-регулювального блоку необхідно відділити його від тягової мережі з мінливою індуктивністю і надати джерелу живлення інвертора характер джерела напруги безконечної потужності [14]. Цю головну функцію і виконує БЕМС, а саме, його LC-фільтр, емність якого надає характер джерела напруги тягової мережі, а індуктивність нівелює мінливий характер індуктивності тягової мережі.

Іншими функціями БЕМС, не менш важливими з точки зору забезпечення роботи тягової електропередачі є:

- обмеження перенапруг на його вході і виході при мережевих комутаціях перенапруг [4,15];
- демпфування коливальних процесів в LC-фільтрі при первинному заряді фільтрового конденсатора і при повторних торканнях струмоприймачем контактного рельсу при відривах [10];
- забезпечення режиму електричного гальмування метровагона при зниженні напруги на його струмоприймачах [1];
- обмеження на допустимому рівні пульсацій тягового струму з метою запобігання негативного впливу на системи автоматики і зв'язку [1,14].

Виконання БЕМС в повній мірі останньої функції в межах традиційного підходу щодо її вирішення, тобто при використанні чисто пасивного LC-фільтра, обумовлює значні масо-габаритні показники блоку [1]. Використання ж гібридного фільтра не тільки дає можливість суттєвого покращення масо-габаритних показників БЕМС, але й значно збільшити степiнь придушення амплітуд гармонік тягового струму [15,16]. Негативними чинниками гібридних фільтрів є ускладнення силової схеми та збільшення втрат потужності у БЕМС в порівнянні з чисто пасивним фільтром, а також достатньо складний алгоритм керу-

вання їх активною ланкою. Як показано в роботі [17], основною проблемою керування активними фільтрами при широкому частотному спектрі придушених гармонік є одночасна наявність трьох видів завад, дві з яких діють на нижній і верхній границях робочого діапазону частот, а третя створюється пасивною ланкою гібридного фільтра.

Щодо втрат потужності, то як показують розрахунки це не є суттєвим негативним чинником. В обох випадках при потужності метровагона 1000 Вт реалізується коефіцієнт корисної дії БЕМС не нижчий за 0,98.

#### ВИСНОВКИ

В напрямку покращення технічних показників метропоїздів перехід на тягові асинхронні електропередачі метровагонів не має на сьогодні альтернативи. При цьому на одне із перших місць виходить проблема створення потужної тягової асинхронної електропередачі метровагона, яка дозволить реалізувати ефективну змішану систему тяги метропоїздів і наблизити показники технічної досконалості метропоїздів  $K_V$ ,  $K_{pek}$ ,  $\eta_M$ ,  $K_M$  та клас експлуатаційної надійності до ідеальних, тобто до  $K_{Vi} = 0,766$ ,  $K_{peki} = 1$ ;  $\eta_{Mi} = 1$ ;  $K_{Mi} = 40\%$  та абсолютного класу експлуатаційної надійності. Вирішенню цієї проблеми і дозволить знизити витрати енергетичних, матеріальних та трудових ресурсів в процесі експлуатації метропоїздів.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. – М.: Транспорт, 1986. – 229с.
- [2] Сементовский Э.И., Севастьянов Н.С., Иткинсон В.А. Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава метрополитенов. – М.: Транспорт, 1987. – 335с.
- [3] Ротанов Н.А., Захарченко Д.Д., Плакс А.В. и др. Проектирование систем управления электроподвижным составом. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
- [4] Ротанов Н.А., Кубасов А.С., Быков Ю.Г., Литовченко В.В. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
- [5] Oi Y., Kato S., Kato T., Yajima A., Ujiie A., Takahara E. IEGT Power Converters for the Shinkansen Traction Systems. // Т. IEE Japan, vol. 121 – D, №3, 2001. – p. 356 – 362.
- [6] Хворост М.В., Гончаров Ю.П., Панасенко М.В. та інш. Тяговий електропривод метровагонів з однозонною характеристикою керування. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, №4, 2003. – с. 25–30.
- [7] Мияшита Т. Технологии НИТАСНИ для железных дорог. // Тез. докл. IV Международной научно-техн. конференции "Состояние и перспективы развития железнодорожного состава" Новочеркасск: ОАО "ВЭЛНИИ", 2003. – с. 16–20.
- [8] Хворост Н.В., Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Панасенко Н.Н. Совершенствование электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины для скоростного пассажирского движения. / Залізничний транспорт України, №6, 2003. – с. 25–31.
- [9] Хворост М.В., Гончаров Ю.П., Панасенко М.В. та інші. Види комутації та енергетичні характеристики в електричних колах з ключовими елементами. / Електротехніка і Електромеханіка, №4, 2005. с. 67–72.
- [10] Хворост Н.В., Никулин В.С., Капустян М.А. Построение входного фильтра блока электромагнитной совмести

тмости тяговой асинхронной электропередачи метровагона. // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, вип. 69, Харків 2005. – с. 115–124.

- [11] Хворост Н.В., Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В. и др. Влияние формы характеристики управления тяговыми асинхронными двигателями метровагонов на равномерность токораспределения при питании от общего инвертора. // Вісник СХУ ім. В. Даля, №8(90), част. 2, Луганськ, 2005. – с. 73–78.
- [12] Rendusara D., Engeti P. An improved output filter configuration reduces common and differential modes du/dt at the motor terminals in PWM drive systems. / IEEE Trans. on Power Electronics, V. 13, 1998, №6. – p. 1135–1143.
- [13] Суслowa К. Н., Лещев А. И. Обоснование варианта схемы автономного инвертора напряжения на модулях IGBT электровозов переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями. // Вестник ОАО "ВЭЛНИИ", 1(50), Новочеркасск, 2006. – с. 148 – 159.
- [14] Хворост Н.В., Чумак В.А. Режимы работы силового фильтра тяговой электропередачи с полупроводниковыми преобразователями магистрального электроподвижного состава постоянного тока. / Електротехніка і Електромеханіка, №1, 2004. – с. 87–92.
- [15] Резенфельд В.Е., Шевченко В.В., Майбога В.А., Долаберидзе Г.П. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока. – М.: Транспорт, 1970. – 240с.
- [16] Сорин Л.Н. Повышение эффективности электровозов новых поколений на основе применения современных информационных технологий. / Автореферат дисс. на соискат. уч. ст. докт. техн. наук, М.: МИИТ, 2005. – 38 с.

Надійшла 13.03.2006

## Список авторів

Б	О
Баранов Михаил Иванович ..... 5, 48	Орловский Игорь Викторович ..... 67
Батыгин Юрий Викторович ..... 54	
Болюх Владимир Федорович ..... 14	П
	Павленко Татьяна Павловна ..... 39
Г	С
Галиновский Александр Михайлович ..... 22	
Глухов Евгений Владимирович ..... 60	
Гречко Никола Владимирович ..... 30	Себко Вадим Пантелеевич ..... 44
Гуль Виктор Иванович ..... 33	Себко Валим Вадимовична ..... 42
	Смородская Инна Васильевна ..... 36
Д	Ф
Дяченко Володимир Валентинович ..... 30	
	Филоненко Денис Владимирович ..... 44
К	Фомин Василий Иосифович ..... 46
Капинос Василий Максимович ..... 36	
Кравченко Владимир Иванович ..... 60, 64	Х
	Хворост Николай Васильевич ..... 71
Л	Ч
Ленская Е.А. .... 22	
Лосев Федор Владимирович ..... 64	Чаплыгин Евгений Александрович ..... 54
Н	Э
Навроцкий Виктор Владимирович ..... 36	
Нижевский Виктор Ильич ..... 33	Эрхард Айхофер ..... 22
Нижевский Илья Викторович ..... 33	
Ноздрачева Екатерина Леонидовна ..... 44	Я
	Яковенко Игорь Владимирович ..... 60, 64

### ПОПРАВКА К СТАТЬЕ "О МАТЕМАТИЧЕСКИХ НЕКОРРЕКТНОСТЯХ...", "Электротехника и Электромеханика" 2006, №3

Вследствие сбоя при компьютерной верстке в статье "О МАТЕМАТИЧЕСКИХ НЕКОРРЕКТНОСТЯХ В ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ" (2006, №3, стр. 64 – 66) были допущены следующие опечатки:

1. На стр. 64 в шести местах вместо  $\varepsilon$  должно быть  $E$ .
2. Физические величины векторного типа в формулах 6, 7 (правая часть), 8, 13 – 19 должны быть обозначены **жирным курсивом**.

# Abstracts

## **ELECTROENGINEERING: Prominent events and great names**

*Baranov M.I.*

### **Retrospective review of research in the field of artificial and atmospheric electricity and lightning protection of technical objects**

This is a short scientific-historical essay about initial stage of mankind's study of magnetic and electric phenomena; about Franklin, Rihman and Lomonosov as founders of technical objects' protec-

5 tion from electric charges of atmospheric electricity (lightnings) and outstanding figures of world physical science; as well as about problematic questions of lightning protection of such objects in modern conditions of technosphere development.

*Key words* – scientific-historical essay, artificial and atmospheric electricity, lightning protection, technical object.

## **Electrical Mashines and Apparatus**

*Bolyukh V.F.*

### **Ways of Improvement of Electromechanical Linear Impulse Converters**

Ways and directions of increasing efficiency for electromechanical linear impulse converters are analyzed to result from design improvement, liquid-nitrogen cooling, optimal parameter synthesis, optimal active elements configuration and application of multi-stage converters with progressive switching of inductor stages. Classification of these converters about design features is introduced.

*Key words* – electromechanical linear impulse converters, efficiency, improvement

*Galinovski A.M., Lenskaya E.A., Erchard Eichhofer*

### **Research on electric machine valve converters with a limited number of fully-controlled valves**

A model of a three-phase/three-phase valve frequency converter is studied under the valves' protective circuit parameters change, the converter based on three diode rectifier bridges that are short-circuited by three fully-controllable switches. It is shown that this converter cannot be used in the excitation system of a noncontact asynchronous machine because of high commutation overvoltage and losses in the converter

*Key words* – three-phase/three-phase frequency converter, controllable protective circuit parameters change, study.

*Grechko M.V., Dyachenko V.V.*

### **On design parameter optimization of automobile inductor generators**

The paper considers questions that are necessary to take into account when designing inductor generators for automobile transport.

*Key words* – inductor generators, designing, parameter optimization, automobile transport.

*Gul V.I., Nigevisky V.I., Nigevisky I.V.*

### **Electric descriptions of two-tier equipotential grounder made from single horizontal electrodes**

Results of research into further development of calculation methods for electric characteristics of grounding devices are given. It is shown that these characteristics are obtained for homogeneous and heterogeneous structure of soil. A generalized mathematical definition for resistance to spreading

14 and potential at any point of soil half-space is introduced. Calculation formulas for electric characteristics of a two-tier equipotential grounder are obtained.

*Key words* – calculation method, electric characteristics, two-tier equipotential grounder

*Kapinos V.M., Navrotsky V.V., Smorodskaya I.V.*

### **Thermal calculation of a tape-type electrical air heater**

Thermal calculation of an electrical heater with a steel tape inside a rectangular channel and symmetrical air flow is presented.

*Key words* – thermal calculation, electrical air heater, steel tape.

22

*Pavlenko T.P.*

### **Charged particle displacement mechanism in the crystal lattice of a contact composite**

The paper considers physical processes in a crystal lattice that affect charged particle displacement mechanism and contact material composites properties. The considered mechanism reveals reasons for atom shocks and their displacement within a lattice vacancy and internodes and specifies action of diffusion and self-diffusion.

*Key words* – charged particle displacement mechanism, crystal lattice, contact material composites.

30

*Cebko V.V.*

### **About influence of dominating impurity on electromagnetic parameters of a cylindrical product**

Influence of a dominating impurity of carbon in steel A-20 on values of magnetic permeability  $m_r$  and specific electric conductivity  $s$  of the cylindrical product made of steel A-20 is considered. It is shown that increase from 0,1 % up to 5,5 % of carbon leads to reduction of  $m_r$  and  $s$  approximately by 40 % and 31 %, accordingly.

*Key words* – magnetic permeability, impurity, specific electric conductivity, converter

33

*Sebko V.P., Filonenko D.V., Nozdrachova K.L.*

### **Calculation of expected values of signal components of a three-parameter electromagnetic converter**

Calculation of a two-frequency contact electromagnetic converter is made on the basis of derivative extremum of normalized internal induc-

36

39

42

44

tance of a rectilinear core. An algorithm of joint determination of two values of resistance and inductance corresponding to frequencies of magnetic current change at the extremum and at any other frequency is introduced.

*Key words* – magnetic current, frequency, electromagnetic converter, resistance, inductance.

*Fomin V.I.*

**Influence of number of sequential isthmuses on protective characteristics of fast fuses**

46

The paper analyzes influence of number of sequential isthmuses of a silver fuse element on protective characteristics of fast fuses.

*Key words* – fast fuse, isthmus number, protective characteristics

## Electrical Engineering: Theory

*Baranov M.I.*

**Electrodynamical development of Bohr's quantum atom theory**

Results of theoretical investigations of micro-electromechanical processes inside the simplest atom of the matter – the hydrogen atom - are presented from the point of view of classical and quantum electrodynamics on the basis of Bohr's atom theory. The results allow a new view on electrophysical mechanism of in-atom quantum effects in the matter.

*Key words* – matter, hydrogen atom, Bohr's theory, microelectromechanical processes, quantum effects.

*Batygin Yu. V., Chaplygin E. A.*

**Vortical currents in flat mettalic sheet**

A theoretical analysis of electrodynamic processes in single-turn inductor systems for magnetic pulse working of sheet metals with real specific conductivity is fulfilled. Reliability of obtained results is verified by means of limit transmissions. The main result reveals the fact that phase bias between an induced signal and inductor current is in the range  $\Delta\varphi \in [0.5\pi, \pi]$ .

*Key words* – electrodynamic processes, inductor system, sheet metals.

*Kravchenko V.I., Yakovenko I.V., Glyhoff E.V.*

**Energy losses in a charged particle flux due to electromagnetic oscillation excitation in semiconductor structures**

48

Electromagnetic oscillation energy in a system of semiconducting plasma – charged particle flux is determined under the oscillation excitation in a submillimeter range. An analytical model of interaction mechanism for the electromagnetic oscillation and currents arising due to action of electromagnetic radiation in current – conducting elements of electric radio apparatus containing semiconductive super lattices is presented.

*Key words* - electromagnetic oscillation energy, semiconducting plasma – charged particle flux system, interaction mechanism, analytical model, electric radio apparatus.

*Kravchenko V.I., Yakovenko I.V., Losev F.V.*

54

**Instability of surface waves at their interaction with a charged particle flux in semiconductor structure**

The paper presents an analytical model of an interaction mechanism for currents arising due to action of electromagnetic radiation in current – conducting elements of electric radio apparatus with inner electromagnetic oscillations of metal – dielectric – semiconductor structures. An instability increment that results from this interaction and specifies oscillation excitation in a submillimeter range is determined.

*Key words* - conducting elements, electromagnetic radiation, currents, interaction model, instability increment, electric radio apparatus.

64

## Electric stations

*Orlovsky I.V.*

**Ways of control perfection in Kharkov CHPP-5 concerning electric energy expenses reduction in its of water chemical preparation shop**

Ways of control system perfection in Kharkov Combined Heat&Power Plant-5 for reduction of electric energy expenses are introduced for the

67

plant's water chemical preparation shop. They are based on prediction of week electricity consumption by the shop and diminishment of its sensors questioning period to week.

*Key words* – combined heat&power plant, energy expenses, consumption predicytion, control system.

## Electric Transport

*Khvorost M.V.*

**Propulsion asynchronous transmission of a high-efficiency underground carriage**

The paper presents a propulsion asynchronous transmission structure for a 1000 kW underground carriage that allows implementing a combined propulsion system for five-carriage underground trains for feeding voltage of 1500 V with the following scheme: two head motorized carriages with driving compartments at the head and at the tail of

71

the train with three other carriages between. It is shown that efficiency of the propulsion asynchronous transmission scheme introduced exceeds 0.92 at inversion pulse- width modulation frequency of 3 kHz even with utilization of current limiting units under voltage inversion failure.

*Key words* – propulsion asynchronous transmission, five-carriage underground train, efficiency.

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТІ І ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В НАУКОВО-ПРАКТИЧНОМУ ЖУРНАЛІ "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА"

Шумилов Ю.А., д.т.н., проф.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"  
Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, НТУУ "КПІ", кафедра "Електромеханіка"  
тел. (044) 241-76-38

Клименко Б.В., д.т.н., проф.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"  
Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра "Електричні апарати"  
тел. (057) 707-62-81, факс (057) 707-66-01, E-mail: eie@kpi.kharkov.ua

*Текст анотації українською мовою, до 5 рядків (для громадян України).*

*Текст анотації на російській мові, до 5 рядків.*

### ВСТУП

У журналі публікуються результати досліджень і огляди у області електричних машин і апаратів, сильних магнітних полів і теоретичної електротехніки, що не публікувалися раніше, методичні матеріали по напрямках підготовки "Електротехніка" і "Електромеханіка", а також інформаційні матеріали за профілем журналу.

Пакет документів, що направляється в редакцію повинен містити:

1) у друкованому варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал (1 екз.) виконаний на аркушах паперу формату А4 густиною 80 - 90 г/м<sup>2</sup>, віддрукований на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 300 dpi;

— акт експертизи з печаткою (для громадян України). Офіційний лист з проханням опублікувати статтю (для громадян зарубіжних країн);

— рецензія (підписується доктором наук і засвідчується печаткою);

— копія документа про оплату за публікацію.

2) в електронному варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал, виконаний у відповідності до даних вимог (без колонтитулів і нумерації сторінок);

— анотація англійською мовою (автори, назва статті, анотація, ключові слова);

— відомості про авторів (прізвище, ім'я, по-батькові повністю, дата народження, місце роботи, посада, основні напрями наукової діяльності).

Анотація і відомості про авторів виконуються у вигляді окремого документа Microsoft Word і з довільним форматом.

Оригінал статті або інформаційних матеріалів готується тільки з використанням редактора Microsoft Word однією з трьох мов: українською, російською або англійською.

### ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТІ

Всі розділи документа повинні містити поля: зліва, справа, зверху – по 20 мм, знизу – 25 мм. Заповнення останньої сторінки повинне бути не менше 80%.

Заголовок статті містить:

— код УДК;

— назва статті (Times New Roman 12pt, жирний, розміщення по центру, заголовні букви, не допускаються перенесення);

— список авторів, вчений ступінь (при необхідності звання і посада), назва організації, поштова адреса, контактні телефони (факс, E-mail). Для авторів різних організацій список приводиться по даній вище формі; — анотації статті українською (обов'язково тільки для громадян України) і російською мовою, обсягом до 5 рядків кожна, оформляються шрифтом Times New Roman 9 pt, жирний, курсив.

Між елементами заголовку статті робиться інтервал в один рядок 10 pt.

### ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Текст розміщується у двох колонках, відстань між якими 5 мм. Абзацні відступи (червоний рядок) – 7,5 мм. Текст набирається шрифтом Times New Roman 10 pt з одиночним міжрядковим інтервалом. Допускається розділення тексту на розділи. Назва розділу оформляється заголовними буквами і центрується, нумерація – не обов'язкова (розділи ВСТУП, ВИСНОВОК і ЛІТЕРАТУРА, якщо такі є, не нумеруються). Перед назвою розділу вставляється один порожній рядок.

Рисунки і широкі таблиці допускається розміщувати в одну колонку. Назва виконується шрифтом розміром 9 pt. Допускається використання рисунків і таблиць без назви: Рис. 1, Табл. 1.

Таблиця 1

Розміри полів тексту статті

Поле зліва	20 мм
Поле справа	20 мм
Поле зверху	20 мм
Поле знизу	25 мм

Рисунки розташовуються у окремих абзацах, з вирівнюванням по центру і оформляються як окремі об'єкти, виконуються в редакторі рисунків Microsoft Word або вставляються в текст статті у форматі *bmp* або *jpg*.

Розташування рисунка поверх тексту і застосування альбомної орієнтації не допускається.

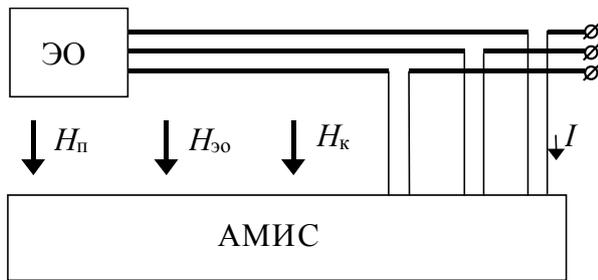


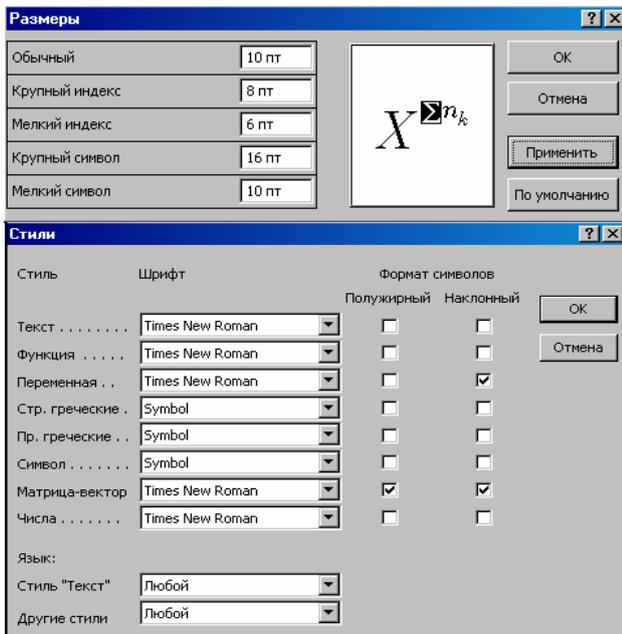
Рис.1. Функціональна схема пристрою

Математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів тільки в редакторі формул Microsoft Equation, розташовуються по центру і нумеруються в межах статті, номер притиснутий до правої сторони колонки. За формулою має слідувати розділовий знак, а якщо формула містить пояснення, то вони повинні починатися з нового абзацу із слова "де" без відступу

$$N = \frac{\tau_{u \max}}{T_{k \text{ внутр}}}, \quad (1)$$

де  $\tau_{u \max}$  - ...,  $T_{k \text{ внутр}}$  - ...

Настройки редактора формул для меню "Розмір" і "Стиль" символів представлені нижче:



Кириличні символи у формулах повинні бути виконані в стилі "Текст".

Щоб уникнути різного роду накладень символів у формулах не рекомендується застосовувати символ ділення /, букву  $\ell$ , а також змінювати розмір об'єкту формули. Крім того, необхідно використовувати символ множення у вигляді крапки.

Великі вирази і рівняння необхідно записувати в декілька рядків

$$Y = \varphi_0(S_n) + \gamma_0 \cdot \int_{S=0}^{S_n} \varphi_0 \cdot \sin(S_n - S) \cdot dS + \gamma_0^2 \cdot \int_{S=0}^{S_n} P_0(S) \cdot \cos(S_n - S) \cdot dS. \quad (2)$$

Символи у формулах і в тексті статті повинні мати однакові зображення.

Перелік літератури розміщується в кінці тексту. Розмір шрифту - 9пт. Після відступу одного порожнього рядку (10пт) від основного тексту по центру колонки розташовують слово ЛІТЕРАТУРА. Нумерація джерел – у порядку посилань по тексту або в алфавітному порядку, номер поміщається у квадратних дужках з виступом.

### ВИСНОВОК

Якщо Ви робите посилання на формули, рисунки, таблиці або літературу, необхідно використовувати наступні позначення: (1), (1) і (2), (1) – (4); рис. 1, рис. 1,а, рис. 1 і 2; табл. 1, табл. 1 і 2; [1], [1 – 3, 5].

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] P.V. Johns, "A symmetrical condensed node for the TLM method", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-35, Apr. 1997, pp. 370-377.
- [2] Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 272 с.
- [3] Лавров В.Я. Численно-аналитический метод расчета помехонесущих магнитных полей // *Техн. электродинамика*. – 1983. - № 61. - С. 18-21.
- [4] Пат. 14813 А Україна. МКИ G 01 R 33/24. Спосіб визначення залишкової та індукованої складових компонента магнітної індукції статичного зовнішнього магнітного поля ферромагнітного виробу / А.В. Єрисов, В.С. Лупіков, В.Ю. Розов та ін.— №95125251; Заявлено 12.12.95; Опубл. 30.06.97. Бюл. №3. — 6 с.
- [5] Минкевич А.В. Физическое пространство — время и релятивистская космология // *Тез. докл. 10-й Росссийск. Гравитац. конф. "Теоретические и экспериментальные проблемы общей теории относительности и гравитации"* (г. Владимир, 20-27 июня 1999 г.). — М.: РГО, 1999. — с. 84.

В кінці статті, через інтервал в 1-2 рядки розміром 10пт, мовою оригіналу вказують дату надходження статті в редакцію журналу (розмір 9пт, курсив, розташування по правому краю). Наприклад:

Поступила 02.07.2006

або

Надійшла 02.07.2006

Матеріали приймаються за адресою:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна

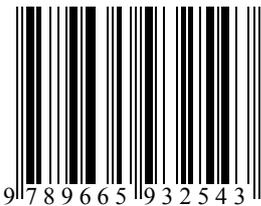
Електронні варіанти матеріалів по E-mail: [kbv@kpi.kharkov.ua](mailto:kbv@kpi.kharkov.ua) [eie@kpi.kharkov.ua](mailto:eie@kpi.kharkov.ua)

Довідки за телефонами: (057) 707-62-81 Клименко Борис Володимирович, Злуніцина Наталя Ростиславівна

**НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ**

*Електротехніка і Електромеханіка*  
*Электротехника и Электромеханика*  
*Electrical engineering & Electromechanics*  
**2006'5**

ISBN 966-593-254-3



Технічне редагування:

Смельянов Вадим Леонідович

т. (057)707-69-76

E-mail: [evl@kpi.kharkov.ua](mailto:evl@kpi.kharkov.ua)

Секретар редакції:

Злуніцина Наталя Ростиславівна

т. (057)707-62-81

E-mail: [seb@kpi.kharkov.ua](mailto:seb@kpi.kharkov.ua)

Підписано до друку 29.09.2006 р.

Формат 60 × 90 1/8. Папір Prima Copy

Друк - офсетний. Ум. друк. арк. 10,3.

Наклад 300 прим. 1-й завод - 130. Зам. № 1433. Ціна договірна.

---

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

---

КП Друкарня №13. 61002, Харків, вул. Артема, 44

---