



---

*Електротехніка і Електроомеханіка*

*Электротехника и Электромеханика*

*Electrical engineering & Electromechanics*

---

**2008'6**



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

**EIE**

**Науково-практичний журнал**

**2008'6**

**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 біомедичної електроніки НТУ "ХПІ", Харків

**Гурін А.Г.** д.т.н., професор, завідувач кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ "ХПІ", Харків

**Данько В.Г.** д.т.н., професор, завідувач кафедри загальної електротехніки НТУ "ХПІ", Харків (голова редакційної ради)

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

**Кириленко О.В.** д.т.н., професор, академік НАНУ, директор ІЕД НАНУ, Київ

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

**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>	Радиоэлектроника: краткая история ее становления в качестве основообразующей физико-технической области электричества и научно-технического прогресса человечества	<b>5</b>
---------------------	--	----------

## ***Електричні машини та апарати***

<b>Безотосный В.Ф., Власенко Э.В., Козлов В.В., Афанасьєва И.О., Набокова О.В., Емельянов В.Л.</b>	Деякі актуальні напрямки неруйнуючого контролю властивостей матеріалів електромагнітними методами	<b>10</b>
<b>Гречко А.М.</b>	Динамические характеристики электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой	<b>14</b>
<b>Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю.</b>	Анализ процессов в активном управляемом выпрямителе – источнике тока в системе пуска асинхронных машин	<b>19</b>
<b>Клименко Б.В.</b>	Електричні та магнітні пристрої: термінологія міжнародного електротехнічного словника	<b>26</b>
<b>Макогон С.А.</b>	Модельовання сил одностороннього магнітного тяжіння в коаксіально-лінійному синхронному вібраторі при несиметричному розташуванні якоря	<b>33</b>
<b>Милых В.И., Ткаченко С.В.</b>	Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний	<b>36</b>
<b>Радимов И.Н., Гулый М.В., Рымша В.В., Чан Тхи Тху Хьонг</b>	Параметры вентильного двигателя с постоянными магнитами	<b>40</b>

## ***Теоретична електротехніка***

<b>Гетьман А.В.</b>	Универсальные селективирующие контуры измерительной системы разнотипных пространственных гармоник магнитного поля	<b>44</b>
<b>Канов Л.Н.</b>	Построение и исследование характеристик феррорезонансной цепи на основе метода схемного моделирования	<b>47</b>

## ***Техніка сильних електричних та магнітних полів***

<b>Баранов М.И.</b>	Шаровая молния – мощный природный молекулярный накопитель атмосферного электричества. Новая гипотеза происхождения и теория электрофизического феномена	<b>51</b>
<b>Батыгин Ю.В., Маджид Бижар, Сериков Г.С.</b>	Исследования индукторной системы для формирования угловых изгибов в листовых заготовках	<b>60</b>

Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Черногор Т.Т.	Эксперименты с индукционными индукторными системами для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов	64
Петков А.А.	Расчет допусков разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств	68

### **Ювілеї**

Намитоков К.К.	К 85-летию со дня рождения	72
<b>Список авторів</b>		73
<b>Abstracts</b>		74
<b>Вимоги</b> до оформлення статей і інформаційних матеріалів у науково-практичному журналі "Електротехніка і електромеханіка"		76

### **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.*

## РАДИОЭЛЕКТРОНИКА: КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕЕ СТАНОВЛЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВООБРАЗУЮЩЕЙ ФИЗИКО–ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

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: eft@kpi.kharkov.ua

*Приведено короткий огляд основних досягнень людства в області генерування, передачі, прийому та посилення високочастотних електромагнітних коливань у мікрометровом – метровом діапазоні довжин хвиль, що відносяться до такої передової галузі науки і техніки як радіоелектроніка.*

*Приведен краткий обзор основных достижений человечества в области генерирования, передачи, приема и усиления высокочастотных электромагнитных колебаний в микрометровом – метровом диапазонах длин волн, относящихся к такой передовой отрасли науки и техники как радиоэлектроника.*

*Окончание. Начало №4, 5 2008 г.*

### 8. СОЗДАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Радиоэлектроника сыграла и продолжает играть сейчас свою важную роль в исследовании атомного ядра материи (любого вещества). В ядерной физике было сравнительно давно (в первой половине XX века) установлено, что для его (ядра) расщепления нужны быстрые "снаряды", размеры которых должны быть соизмеримы с размерами расщепляемых ядер. Известно, что для большинства ядер химических элементов их радиус  $R_{\text{Я}}$  приблизительно определяется следующим соотношением [13]:  $R_{\text{Я}} = R_0 \cdot A^{1/3}$ , где  $A$  – массовое число ядра, равное сумме числа его элементарных частиц протонов  $Z$  и нейтронов  $N$  (например, для ядра природного урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  величина его массового числа оказывается точно равной:  $A = Z + N = 92 + 146 = 238$ ), а  $R_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$  м. Тогда на основании приведенного выше эмпирического соотношения получаем, что для ядра урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  численное значение  $R_{\text{Я}}$  составляет около  $7,44 \cdot 10^{-15}$  м. Поэтому физики-ядерщики в своем выборе таких ядерных "снарядов" остановились, в основном, на отрицательно заряженных электронах (открыты в 1897 году английским физиком Дж. Томсоном), положительно заряженных протонах (открыты в 1886 году немецким физиком Е. Гольдштейном) и незаряженных нейтронах (открыты в 1932 году английским физиком Д. Чэдвиком) [6, 19]. Заметим, что природные ядерные "снаряды" в виде относительно тяжелых альфа-частиц (ядер атомов инертного газа гелия  ${}^4_2\text{He}$ ), испускаемые при естественном распаде ядер такого радиоактивного элемента как радий  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  и имеющие при вылете из него скорость около 20 км/с, обладают энергией не достаточной для разрушения (расщепления) ядер многих химических элементов из периодической системы Д.И. Менделеева. Поэтому для осуществления многих ядерных реакций и исследований

требуются ускоренные до больших скоростей отрицательно заряженные электроны массой покоя  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг, положительно заряженные протоны массой  $m_p = 1836 \cdot m_e$  и электрически нейтральные нейтроны массой  $m_n = 1839 \cdot m_e$  [13, 19].

В истории развития ядерной физики, техники и энергетики роль ядерных "пушек", разгоняющих для проведения ядерных исследований элементарные частицы микромира (ядерные "снаряды") до требуемых скоростей (энергий), выполнили и выполняют поныне такие весьма сложные и дорогостоящие радиоэлектронные устройства высокого электрического напряжения как ускорители заряженных частиц (УЗЧ) [6, 13]. По физическому принципу своего действия УЗЧ напоминают гигантскую высоковольтную электровакуумную радиолампу, между электродами которой и происходит ускорение сильным электрическим полем тех или иных элементарных частиц.

**Линейные ускорители электронов.** В линейном ускорителе электронов (ЛУЭ) испускаемым за счет явления термоэлектронной эмиссии [15] раскаленным отрицательно заряженным катодом электронам нужную скорость в большом (в десятки м<sup>3</sup>) отвакуумированном объеме придает положительно заряженный анод [6]. Чем выше электрическое напряжение  $U_{\text{АК}}$  между анодом и катодом в ЛУЭ, тем выше и скорость (энергия) ускоряемых в нем электронов. Ограничением уровня напряжения  $U_{\text{АК}}$  здесь является электрическая прочность изоляционного промежутка между катодом и анодом ускоряющей трубы ЛУЭ. При определенном значении напряжения  $U_{\text{АК}}$  между катодом и анодом ЛУЭ может произойти электрический пробой межэлектродного промежутка отвакуумированного объема, в котором возникает импульсная электрическая искра или непрерывная электрическая дуга. Поэтому повышать напряжение  $U_{\text{АК}}$  в ЛУЭ с обычными двумя электродами можно лишь до известного предела. Выход из этой трудной электротехнической и высоковольтной задачи был найден благодаря созданию для ЛУЭ специальной ускоритель-

ной трубы, состоящей не из пары электродов как в радиодиоде, а из ряда полых металлических цилиндров, расположенных на определенном расстоянии друг от друга вдоль одной продольной оси ЛУЭ. К этим цилиндрам-электродам подводится переменное напряжение  $U_{МЭ}$ , частота электрических колебаний которого строго согласовывается с длиной цилиндров (временем пролета электронов вдоль них) и расстоянием между цилиндрами (временем пролета электронов вдоль этих изоляционных промежутков).

Данный принцип построения УЗЧ был предложен и практически реализован в 1931 году известным американским физиком Э. Лоуренсом при создании мощного линейного ускорителя ионов [6]: здесь ионы (в частности, ядра атома водорода), проходя через ряд полых соосных металлических цилиндров увеличивающейся длины, ускорялись высоким высокочастотным напряжением так, что в вакуумных зазорах между цилиндрами ионы попадали в ускоряющую фазу. В этой связи для ЛУЭ, использующего этот принцип ускорения электронов, можно говорить о резонансе ускорения: последовательное ускорение электрическим полем пролетающих между цилиндрами электронов происходит в такт изменения напряжения  $U_{МЭ}$ . Поэтому при относительно больших продольных размерах ЛУЭ с помощью относительно небольших значений высокого электрического напряжения  $U_{МЭ}$  в нем можно получать огромные значения кинетической энергии ускоренных электронов.

Отметим здесь то, что в соответствии с принятыми представлениями о волновой природе вещества [13, 19] для обнаружения с помощью электронов эффектов, связанных с конечными размерами ядра, для ускоренных в ЛУЭ электронов необходимо, чтобы длина волны электронов  $\lambda_e$  была меньше или порядка  $10^{-15}$  м. Этой длине электронной волны  $\lambda_e$  удовлетворяют ультрарелятивистские электроны с энергией  $W_e$ , значительно большей, чем величина их энергии, найденная, исходя из знаменитой формулы Эйнштейна  $m_{er}c^2 = 0,511$  МэВ, где  $m_{er} = m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса релятивистского электрона, а  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме. Для указанной величины длины  $\lambda_e = 10^{-15}$  м соответствующее ей значение энергии электрона может быть определено по известной квантовомеханической формуле [13]:  $W_e = hc/\lambda_e = 1,24$  ГэВ, где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка [17]. Рекордные значения энергии ультрарелятивистских электронов  $W_e$  в свое время были получены на стэнфордском ЛУЭ (США), которые составили около 20 ГэВ [13]. Таким огромным значениям энергии  $W_e$  ускоренных в ЛУЭ электронов соответствуют ультракороткие значения длин электронных волн, численно равные согласно приведенной выше формуле  $\lambda_e = hc/W_e = 6,2 \cdot 10^{-17}$  м. Именно с помощью таких высокоэнергетичных ультрарелятивистских электронов с предельно короткими длинами  $\lambda_e$  их волн, значительно меньшими радиуса ядер  $R_{Я}$  всех известных

нам химических элементов, и были выявлены новые механизмы внутриядерных взаимодействий нуклонов и других участвующих в этом микропроцессе элементарных частиц, а также открыты новые типы ядерных реакций и изучены новые микрочастицы.

Важной вехой в создании и научно-техническом использовании ЛУЭ в бывшем СССР и Украине остаются работы, выполненные ранее и проводимые сейчас в ННЦ "Харьковский физико-технический институт" (ХФТИ) НАНУ [6, 20]. Согласно [21, 22] мощные электронные пучки с энергией электронов  $W_e$  в диапазоне от 1 до 10 МэВ, создаваемые ЛУЭ, в настоящее время находят технологическое применение при: стерилизации медицинского инструмента, создании вакцин, очистке выбросных промышленных газов и пучково-озонной регенеративной очистке воды. Мощные генераторы ускоренных в вакууме сверхсильным электрическим полем релятивистских электронов с энергией до 10 МэВ (при импульсном токе электронного пучка до 1 МА и его длительности до 10 нс) сейчас используются в экспериментальной физике при осуществлении поисковых импульсных термоядерных реакций в рамках решения с их помощью энергетической термоядерной проблемы [23].

**Линейные ускорители протонов.** На рис. 9 показана принципиальная схема построения современного линейного ускорителя протонов (ЛУП) [2, 23]. В откачированный предварительно цилиндрический объем заземленного металлического корпуса 2 ЛУП через вентиль 1 малыми порциями подается водород. На торцах этого объема внутри корпуса 2 размещены плоские конструкции анода 3 и катода 4, подсоединенные к источнику высокого постоянного напряжения (ИВПН) 5. В процессе ударной ионизации разряженного водорода внутри корпуса 2 от каждого его атома отделяется по одному электрону, которые устремляются под действием напряженности постоянного электрического поля  $E_{AK} = U_{AK}/S_{AK}$ , где  $U_{AK}$ ,  $S_{AK}$  – соответственно напряжение и расстояние между анодом и катодом ЛУП, к положительно заряженному аноду 3. Образовавшиеся же при этом внутри корпуса 2 ЛУП положительно заряженные ядра водорода (протоны) устремляются к отрицательно заряженному катоду 4, имеющему центральное круговое отверстие, ведущее протоны в ускорительную трубу с металлическим корпусом 6. За счет ИВПН 5 протоны, как правило, приобретают на первой стадии своего ускорения в корпусе 2 ЛУП кинетическую энергию  $W_p$  порядка 1 МэВ [2, 6]. Пролетев через тонкую входную металлическую диафрагму корпуса 6, протоны попадают в область действия сильных ускоряющих электрических полей, создаваемых в соответствии с указанным выше принципом ускорения заряженных частиц Э. Лоуренса между тонкими полыми соосными металлическими цилиндрами 7 (увеличивающейся вдоль ЛУП слева на право к выходу протонов из корпуса 6 длины) источниками и высокого высокочастотного напряжения (ИВВН) 8.

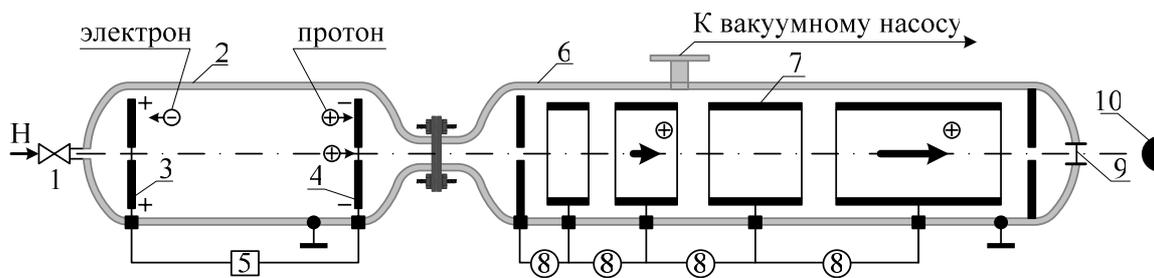


Рис. 9. Классическая упрощенная схема построения ЛУП

В результате резонансного ускорения протоны в приведенной на рис.9 схеме ЛУП на его выходе (у правого края корпуса 6) приобретают достаточно большую энергию  $W_p$ , достигающую численных значений порядка 30 МэВ [2, 6]. Пронизав на выходе ускорительной трубы по центру корпуса 6 тонкую металлическую диафрагму (фольгу) 9, закрывающую откакумированный объем трубы от внешней среды, ускоренные протоны направляются на ядерную мишень 10. Заметим, что при получении в ЛУП подобной рис. 9 конструкции протонов с выходной энергией  $W_p=32$  МэВ его общая длина составляет около 20 м [2, 6]. Как видим, расположение в линейных УЗЧ ускоряющих электродов вдоль их продольной оси приводит к весьма большим геометрическим размерам, прежде всего, их ускорительной трубы, что можно отнести к определенным недостаткам такого типа УЗЧ. Укажем ниже некоторые известные данные из истории получения с помощью ЛУП и применения в ядерных исследованиях протонов высоких энергий.

В 1930-1932 годах в Кембриджском университете (Англия) известные английские физики Дж. Кокрофт и Э. Уолтон, применяя каскадный метод повышения электрического напряжения (для ИВПН 5 на рис.9) до уровня порядка 1 МВ, получили ускоренные протоны с энергией до 1 МэВ [6]. С помощью таких протонов ими в 1932 году было осуществлено расщепление ядра изотопа лития  ${}^7_3\text{Li}$  на два ядра атома гелия  ${}^4_2\text{He}$  (на две  $\alpha$ -частицы), разлетающиеся с энергией около 8,5 МэВ [6, 13]. Почему тогда ими была использована ядерная мишень 10 (см. рис. 9) из щелочноземельного металла лития? Объясняется это весьма просто: указанный изотоп лития  ${}^7_3\text{Li}$  имеет малую энергию связи (5,57 МэВ/нуклон [6]), равную работе, которую необходимо затратить для расщепления его ядра на составляющие его нуклоны (объединенные элементарные частицы, состоящие из взаимно переходящих друг в друга протона и нейтрона [18]). Осуществленное Дж. Кокрофтом и Э. Уолтоном в 1932 году разрушение (расщепление) протонами высокой энергии ядра изотопа лития  ${}^7_3\text{Li}$  стало первой в мире ядерной реакцией, выполненной на УЗЧ [6, 13]. За данную работу они в 1951 году были удостоены Нобелевской премии по физике. Всего через несколько месяцев после указанных выше пионерских ядерных исследований в Англии уже в СССР с помощью созданного известными советскими физиками А.К. Вальтером и К.Д. Синельниковым в Украинском физико-техническом институте (УФТИ, ныне ННЦ "ХФТИ" НАНУ) самого мощного

по тем временам ЛУП в том же 1932 году было также осуществлено расщепление ядра изотопа лития  ${}^7_3\text{Li}$  и других ядер искусственно ускоренными протонами с энергией в 2,5 МэВ [6, 23]. Здесь важно отметить то, что у истоков зарождения в Украине (в частности, в г. Харькове) ядерной физики стоял выдающийся советский физик-ядерщик и организатор науки И.В. Курчатов. Созданный тогда в УФТИ на основе электростатического генератора Ван де Граафа на номинальное напряжение 5 МВ Харьковский ЛУП имел следующие характеристики [6, 23]: диаметр металлических шаров ускорителя - 10 м; длину ускорительной трубы - 15 м; давление газа в ускорительной трубе  $-4 \cdot 10^{-6}$  мм.рт.ст.

**Циклические ускорители частиц.** Важным научнотехническим событием для дальнейшего развития ядерной физики стало создание действующего циклического УЗЧ, названного *циклотроном* [6] (первая составная часть этого сложного термина происходит от греческого слова "kyklos" – "круг" [1]). Отметим, что сам принцип циклического ускорения заряженных микрочастиц был предложен упомянутым нами Э. Лоуренсом еще в 1930 году [6, 13]. В циклотроне движение ускоряемых электрическим полем заряженных частиц происходит в постоянном магнитном поле по разворачивающейся спирали. При этом вектор индукции "заворачивающего" магнитного поля направлен перпендикулярно плоскости вращения микрочастицы, а частота ускоряющего электрического поля совпадает с частотой обращения микрочастицы в циклотроне. Таким путем в циклотроне обеспечивается соблюдение необходимого условия резонанса ускорения. Заметим, что циклотрон, предназначенный для ускорения электронов, получил название *микротрона* (первая составная часть этого сложного термина происходит от греческого слова "mikros" – "малый" [1]). В 1932 году под руководством Э. Лоуренса в США был построен первый циклотрон с диаметром полюсных наконечников электромагнита всего в 0,28м, который позволял ускорять протоны до энергии в 1,2 МэВ [6]. За изобретение циклотрона Э. Лоуренсу в 1939 году была присуждена Нобелевская премия по физике. В СССР первый пучок ускоренных на циклотроне Радиевского института (г. Ленинград) протонов был получен в 1937 году [6]. Созданию этого циклотрона много времени и сил отдал И.В. Курчатов, работавший тогда в ЛФТИ. Он прекрасно понимал необходимость создания технической базы отечественной ядерной физики. Вплоть до начала второй мировой войны он активно трудился над разработкой и созданием нового мощного циклотрона с диаметром полюсов электромагнита в 1,2 м, проектный срок ввода которого в эксплуатацию намечался на 1

января 1942 года [6].

По мере создания более мощных циклотронов и получения с их помощью протонов и других частиц более высоких энергий физики столкнулись с трудной задачей: при определенных скоростях ускоряемых частиц наступало рассогласование в работе циклотрона и микрочастицы начинали тормозиться. В результате для циклотрона наступал предел по достигаемой скорости и соответственно по энергии ускоряемых частиц. Физики-теоретики объяснили это явление возрастанием массы ускоряемой микрочастицы по мере приближения ее скорости к скорости света в вакууме. За счет возрастания массы частицы и происходило рассогласование процесса ее ускорения в циклотроне. Первым решил эту задачу советский физик В.И. Векслер в 1944 году. Год спустя аналогичное решение нашел американский физик Е.М. МакМиллан. Эти ученые разработали два способа компенсации увеличения массы ускоряемых в циклотроне частиц, движущихся с околосветовой скоростью [2, 6]: первый – постепенное изменение по мере ускорения частицы частоты ускоряющего электрического поля; второй – постепенное изменение в процессе ускорения частицы индукции магнитного поля (силы электромагнита). В настоящее время в УЗЧ циклотронного типа одновременно используются эти два способа повышения выходной энергии ускоряемых высоким напряжением  $U_{МЭ}$  микрочастиц. В современных мощных циклотронах энергия ускоренных протонов  $W_p$  может достигать уровня до 1 ГэВ [1,13].

Дальнейшим развитием УЗЧ, использующих эффект резонансного ускорения микрочастиц, стали *синхротрон*, *фазотрон* и *синхрофазотрон*, а также ускорители, основанные на методе индукционного ускорения электронов (*бетатроны*) [13]. В последнее время новым типом УЗЧ являются ускорители на встречных пучках (*колайдеры*), в которых энергия сталкивающихся частиц практически вся переходит во внутреннюю энергию возбуждаемых ядер вещества и на рождение новых элементарных частиц [13, 17].

## 9. СОЗДАНИЕ КВАНТОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Развитие в мире техники сверхвысоких радиочастот, прежде всего, для решения задач радиолокации и успехи квантовой физики (например, создание в 1916 году великим физиком 20-го века А. Эйнштейном теории и дальнейшее открытие явления индуцированного излучения энергии атомами и молекулами) привели к созданию квантовой электроники, изучающей вынужденное излучение твердыми телами и газами сверхвысокочастотных электромагнитных волн под влиянием падающего на них извне излучения, а также электронные устройства (усилители и генераторы электромагнитных волн), действие которых основано на использовании вынужденного электромагнитного излучения [1, 13]. Индуцированное (вынужденное) излучение когерентно и находится в определенном фазовом соотношении с внешними усиливаемыми электромагнитными микроволнами. Для того чтобы система атомов (молекул) вещества излучала

больше энергии, чем поглощала, необходимо, чтобы число атомов (молекул) в возбужденном состоянии было больше числа этих «кирпичиков мироздания» в своем нижележащем энергетическом состоянии. Если это условие соблюдается, то говорят, что вещество обладает *инверсной заселенностью* и находится в неравновесном энергетическом состоянии. Поэтому одними из основных задач квантовой электроники стали поиск и разработка методов создания в твердых телах и газах неравновесных атомных систем с инверсной заселенностью, а также создание электронных устройств для усиления электромагнитных колебаний на основе индуцированного излучения.

**Молекулярный квантовый генератор.** Молекулярный генератор или усилитель (мазер) является усилителем микроволн, работающим на принципе вынужденного (индуцированного) излучения [13]. Название "*мазер*" происходит от английских слов "*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" – "*усиление микроволн при помощи индуцированного излучения*" [1, 13]. Главным конструктивным элементом мазера является резонатор с активным веществом, в котором при определенных условиях возникает индуцированное излучение. Резонатор имеет два ввода: один – для подачи энергии подкачки и создания инверсионной заселенности в молекулах активного вещества, а другой – для поступления усиливаемых и отвода усиленных высокочастотных электромагнитных волн. Для разделения во втором вводе электрических сигналов, проходящих в противоположных направлениях по одному волноводу и существенно отличающихся по высокочастотной мощности, применяются развязывающие циркуляторы [8]. В первом мазере, созданном в 1954 году советскими физиками Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым, инверсионная заселенность молекул активного вещества обеспечивалась с помощью неоднородного электростатического поля. В качестве рабочего вещества в мазерах используются аммиак  $NH_3$ , водород, формальдегид и др. В первом советском мазере (генераторе стабильных сантиметровых электромагнитных волн с длиной волны  $\lambda_M = 1,27$  см [6, 13]) использовались квантовые переходы между дискретными энергетическими уровнями в молекулах аммиака  $NH_3$ . Молекулярные часы, построенные на основе такого мазера, имеют точность хода, равную 1с за 300 лет [13]. Мазеры, обладающие высокой монохроматичностью, когерентностью и узкой направленностью высокочастотного электромагнитного излучения, в настоящее время широко применяются в радиоастрономии, радиолокации, космической связи и эталонах частоты.

**Оптический квантовый генератор.** Оптический генератор (лазер) является усилителем сверхвысокочастотных электромагнитных волн в оптической области спектра. Название или термин "*лазер*" происходит от английских слов "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" – "*усиление света при помощи индуцированного излучения*" [1, 13]. Лазер, как и мазер, работает также по принципу вынужденного (индуцированного) излучения. Активными веществами в резонаторах лазера являются различные диэлек-

трические кристаллы, стекла, газы, полупроводники и плазма. В первом оптическом квантовом генераторе в качестве активного вещества был применен кристалл рубина (оксид алюминия, в кристаллической решетке которого некоторые атомы алюминия замещены ионами хрома  $Cr^{3+}$  [13]). Именно ионы хрома и являются в рубиновом лазере активными атомами, допускающими инверсионную заселенность. Рубиновый лазер усиливает и излучает красный свет с основной длиной волны  $\lambda_{л}=694,3$  нм [6, 13]. Инверсионная заселенность в рубиновом лазере достигается путем освещения кристалла рубина мощной вспышкой света. Как известно, такой процесс называют оптической накачкой. Вспышка света переводит атомы хрома в кристалле рубина (выполнен в виде цилиндра диаметром 1 см и длиной 10 см) из основного энергетического состояния в возбужденное. При управляемом переходе возбужденных атомов хрома в их основное состояние в активном веществе, размещенном в резонаторе, возникает индуцированное излучение. Резонатором в данном лазере являются два зеркала (разнесены на расстояние много больше длины волны излучения), одно из которых полупрозрачно (со стороны выхода усиленных волн). Импульсная мощность излучения рубинового лазера достигает  $10^6$  Вт с  $1\text{ см}^2$  торца цилиндра из нагреваемого кристаллического рубина (расходимость пучка излучения не превышает  $0,5^\circ$ ; при температуре рубина в  $1000^\circ\text{C}$  такой лазер перестает работать). В лазерах на твердом теле в качестве активного вещества употребляется также неодимовое стекло, в котором активными атомами являются ионы неодима  $Nd^{3+}$ . Неодимовый лазер генерирует инфракрасное излучение с длиной волны  $1,06$  мкм [13]. В газовом гелий-неоновом лазере в непрерывном режиме работы выходная мощность излучаемого им красного света с длиной волны  $632,8$  нм составляет до  $300$  мВт. Лазер на углекислом газе  $CO_2$  в непрерывном режиме генерирует инфракрасное излучение мощностью до  $10$  кВт, а аргоновый лазер – излучение в видимой области спектра мощностью до  $1$  кВт [13]. В импульсном режиме мощность указанных газовых лазеров достигает сотен киловатт. Лазеры нашли применение в промышленности (при сверлении отверстий в твердых материалах), научных исследованиях и медицине. Изобретение квантовых генераторов позволило создать усилители высокочастотных электромагнитных колебаний, выходные параметры которых в сотни раз превышают параметры (например, чувствительность) лучших радиоусилителей. В 1964 году основатели квантовой электроники Г.Н. Басов, А.М. Прохоров (СССР) и Ч. Таунс (США) были удостоены Нобелевской премии по физике.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. - М.: Русские словари, 2004. - 957с.
- [2] Плоский А.Ф. Как человек приручил волну.- М.: Сов. Россия, 1958.-224 с.
- [3] Баранов М.И. Джеймс Клерк Максвелл и теория электромагнитного поля // *Электротехніка і електромеханіка*.-2005.- №1.- С. 5-7.
- [4] Баранов М.И. Генрих Рудольф Герц – первооткрыватель электромагнитных волн // *Электротехніка і електромеханіка*.-2006.- №1.- С. 5-11.
- [5] Григорьян А.Т., Вьяльцев А.Н. Генрих Герц. 1857-1894.- М.: Наука, 1968.- 309 с.
- [6] Кудрявцев П.С. Курс истории физики.- М.: Просвещение, 1974.-312 с.
- [7] Попов А.С. Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний // *Журнал русского физико-химического общества. Серия физическая*.-1896.- Т.28.-С. 1-14.
- [8] Мельник Ю.А., Стогов Г.В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства.- М.: Сов. радио, 1973.- 368 с.
- [9] Баранов М.И. Оливер Хевисайд и его вклад в мировую сокровищницу науки // *Электротехніка і електромеханіка*.-2005.- №4.- С. 5-14.
- [10] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1.- Л.: Энергоиздат, 1981.- 536 с.
- [11] Финкельштейн М.И. Основы радиолокации.- М.: Сов. радио, 1973.- 496 с.
- [12] Жукова Л.Н. Лодыгин / Серия: Жизнь замечательных людей.- М.: Молодая гвардия, 1989.-304 с.
- [13] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.- 864 с.
- [14] Баранов М.И. Ретроспектива исследований в области искусственного и атмосферного электричества и молниезащиты технических объектов // *Электротехніка і електромеханіка*.-2006.- №5.- С. 5-13.
- [15] Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник.- Киев: Наукова думка, 1981. -338 с.
- [16] Ваврин Д.М., Казанцев В.И., Канило П.М., Лебедюк И.Н. и др. Использование СВЧ-энергии для безмазутного розжига и стабилизации горения низкосортных углей// *Вестник МГТУ им. Баумана*.-2003.-№1.-С.87-97.
- [17] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990.-624 с.
- [18] Баранов М.И. Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики и ядерной энергетики// *Электротехніка і електромеханіка*.-2007.- №2.- С.5-12; №3.- С. 5-11.
- [19] Баранов М.И. Эрвин Шредингер и новые пути развития физической науки микромира// *Электротехніка і електромеханіка*.-2006.- №4.- С. 5-15.
- [20] Onishchenko I.N. Progress in plasma wakefield acceleration driven by a short intense bunch of relativistic electrons// *Problems of Atomic Science and Technology*.-2006.-№6.-Series: Plasma Physics (12).- p. 158-162.
- [21] Adler R.J. Comparison of DC and pulsed beams for commercial applications// *10<sup>th</sup> International Conference on High Power Particle Beams*.-San Diego, USA (20-24 June 1994).-Vol. 1.- P. 29-32.
- [22] Гурин А.Г., Корнилов Е.А., Ложкин Р.С. Контроль работоспособности изоляции линейного индукционного ускорителя, применяемого для промышленных целей// *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка. Харків: НТУ "ХПІ".-2005.- №42.-С. 16-20.
- [23] Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии // *Электротехніка і електромеханіка*.-2007.- №5.- С. 48-60.

Поступила 21.11.2007

## **ДЕЯКІ АКТУАЛЬНІ НАПРЯМКИ НЕРУЙНУЮЧОГО КОНТРОЛЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ МЕТОДАМИ**

Безотосний В.Ф., к.т.н., доц., Власенко Е.В., к.т.н., доц., Козлов В.В., к.т.н., доц., Афанасьєва І.О.,  
Набокова О.В.

Запорозький національний технічний університет

Україна, 69063, Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, кафедра "Теоретична та загальна електротехніка"  
тел. (061)228-16-12

Смельянов В.Л.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра "Електричні апарати"  
тел. (057)707-68-64

*В статті розглядаються питання контролю неелектричних та електричних параметрів матеріалів електромагнітними методами. Пропонується система автоматичного неруйнуючого контролю механічних напружень в деталях радіоелектронної апаратури.*

*У статті розглянуто питання контролю неелектричних та електричних параметрів матеріалів електромагнітними методами. Пропонується система неруйнуючого автоматичного контролю механічних напружень у деталях радіоелектронної апаратури.*

Одним з напрямків наукової роботи кафедри "Теоретична та загальна електротехніка" Запорізького національного технічного університету (ЗНТУ) є питання контролю неелектричних та електричних параметрів матеріалів електромагнітними методами. Результати деяких з них наведені нижче.

### **РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИ ОДНОЧАСНОМУ НАМАГНІЧУВАННІ ДЕКІЛЬКОХ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ РІЗНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

Електромагнітні перетворювачі знайшли широке застосування для контролю електромагнітних властивостей матеріалів, їхньої структури, товщини покриттів та інше. Особливий інтерес у цьому плані представляє розгляд перетворювачів зі спрямованим магнітним потоком, які дозволяють одержати однорідний магнітний потік в області контролю досліджуваного матеріалу, що значно підвищує точність контролю. Вірогідність розрахунку параметрів подібних перетворювачів значною мірою визначається точністю розрахунку магнітного опору намагніченої ділянки матеріалу. Відомі формули для розрахунку магнітного опору матеріалів отримані для випадку намагнічування матеріалів з однорідними електромагнітними властивостями двохполюсними перетворювачами. Однак, часто необхідно розраховувати перетворювачі при намагнічуванні двошарових феромагнітних матеріалів.

Типова конструкція перетворювача, яка застосовується для намагнічування двошарових матеріалів, виконана із трьох магнітопроводів з розмішеними на них обмотками. Таке конструктивне виконання перетворювача дозволяє одержати однорідний магнітний потік в зоні контролю матеріалу та через магнітопровід з вимірювальною обмоткою.

Для розрахунку вихідного сигналу перетворювача необхідно насамперед визначити магнітний опір

двошарового середовища, тому що магнітні опори магнітопроводу й зазору можуть бути визначені за відомими співвідношеннями.

При розрахунку магнітного опору двошарового матеріалу допущено, що:

напруженість магнітного поля не змінюється по поверхні контрольованого матеріалу уздовж активної бази перетворювача, а змінюється тільки по глибині матеріалу;

потоком, що проходить в області матеріалу, за межами об'єму між полюсами середнього магнітопроводу можна зневажити.

Для обґрунтування прийнятих допущень було проведено експеримент з використанням голчастого датчика, що виконано із двох електродів з відстанню між ними на порядок менш ніж активна база перетворювача. Голчастий датчик переміщався по поверхні матеріалу уздовж активної бази перетворювача. Як контрольований матеріал використалася пластина розміром 20×20×0,5 см, що виконана зі сталі Ст.3. Результати експерименту показали, що при будь-якій силі й частоті струму, вихідний сигнал з голчастого датчика вздовж активної бази перетворювача змінюється не більш ніж на 4%.

Експериментами також доказано, що при проникненні електромагнітної хвилі в матеріал феромагнітного покриття відбувається зсув за фазою між прямою та відбитою хвилями, при цьому модуль амплітуди прямої хвилі на декілька порядків більше модуля амплітуди відбитої хвилі, що дозволило визначити постійні інтегрування для всіх реальних феромагнітних покриттів.

Проведеними дослідженнями одержані співвідношення глибини проникнення електромагнітного поля в перший та другий феромагнітні шари та їх магнітних опорів. Подальший розрахунок накладних електромагнітних перетворювачів з локалізованим

магнітним потоком для двошарових феромагнітних матеріалів виконується за методикам, що розроблені авторами раніш.

#### ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЬ МЕХАНІЧНИХ НАПРУГ В ДЕТАЛЯХ ТА КОНСТРУКЦІЯХ РЕА ЗА ДОПОМОГОЮ АЦП ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Одним з завдань при неруйнуючому контролі, наприклад радіотехнічних феромагнітних матеріалів і конструкцій, є визначення механічних напруг, виникнення яких обумовлене дією експлуатаційних і технологічних факторів. При контролі механічних напруг у відповідальних вузлах і деталях складних радіоелектронних систем, де кількість контрольованих точок десятки і сотні, а контроль повинен бути діагностичним й оперативним, необхідно використання спеціалізованих або універсальних ЕОМ. В основу побудови автоматичної системи контролю (АСК) механічних напруг у *m*-точках будь-якої конструкції РЕА, чи бортових конструкціях різних об'єктів, може бути покладена розроблена блок-схема. Функціональне призначення електронного комутатора (ЕК) і аналогоцифрового перетворювача (АЦП) не вимагає пояснень. Кожний вихідний сигнал АЦП має цифровий код, що відповідає значенню контрольованого перетворювачем параметру. Сигнали з виходу АЦП надходять в арифметичний пристрій (АП), у якому відбувається порівняння з верхнім і нижнім припустимими значеннями кожного параметру. Інформація про припустимі межі зберігається в довгостроковому запам'ятовувальному пристрої (ДЗП) ЕОМ. Пристрій керування (ПК) служить для забезпечення синхронності роботи ЕК, АЦП, АП й ДЗП. Результат порівняння надходить на вхід логічного пристрою (ЛП). Якщо контрольований параметр перебуває в полі допуску, він записується в осередок оперативної пам'яті ЕОМ, а також може бути записаний пристроєм, що реєструє (РП). При виході контрольованого параметра за межі поля допуску, сигнал з ЛП подається в пристрій керування, що конкретизує номер контрольної точки виміру й значення відхилення механічної напруги від припустимого. При необхідності інформація про параметр, що вийшов за поле допуску, з ЛП подається в підсистему діагностичного контролю (ПДК), що встановлює причину відхилення.

Одними з основних елементів будь-якої автоматизованої системи контролю є чутливі елементи-перетворювачі, від чутливості й надійності яких у першу чергу залежить ефективність роботи АСК. З широкого класу перетворювачів, які можуть бути використані в АСК, варто віддавати перевагу магнітопружним (МП), які відрізняються винятковою надійністю й потужним вихідним сигналом. Застосування МП пов'язане з безконтактним способом визначення механічних напруг у напружених елементах конструкцій, а це дозволяє розглядати АСК з більш широкими функціональними можливостями.

Застосування різного роду компенсаційних схем для усунення початкового сигналу обмежує швидкість й можливості АСК, тому що потрібні додаткові регульовальні операції при установці АСК із об'єкта на об'єкт. У розглянутому плані більше ефективні

МП, виконані за мостовою схемою, які дозволяють відразу одержувати корисну інформацію без накладення початкового сигналу й з мінімальним впливом коливань навколишньої температури на опір обмоток і сполучних проводів. При відсутності механічних напруг в області контролю у вимірювальній обмотці електрорушійна сила (ЕРС) не наводиться. Механічні напруги, що виникають при впливі на матеріал зусиль, порушують симетрію магнітного поля щодо вимірювального магнітопроводу та призводять до відгалуження частини потоку. Узгодження сигналу МП із блоком цифрового АЦП може здійснюватися як на змінному, так і на постійному струмах. Схеми узгодження на змінному струмі простіше, однак узгодження при цьому має ряд істотних недоліків у порівнянні з методом узгодження на постійному струмі. Фазове зрушення сигналу з перетворювача стосовно напруги порушення вимагає установки у вихідні кола кожного перетворювача фазо-зсунених пристроїв, і індивідуального настроювання їх при кожній зміні точок контролю механічних напруг у конструкціях. До того ж ці пристрої піддаються значним температурним похибкам. Більшість промислових аналогоцифрових перетворювачів призначені для перетворення постійної-аналогової напруги, тому між блоком ЕК і блоком АЦП є кільцевий демодулятор (КД).

Розроблена система автоматичного контролю механічних напруг у деталях та вузлах РЕА і бортових конструкцій може бути успішно використана для контролю статистичних та динамічних механічних напруг у діапазоні (0...4).107 Н/м<sup>2</sup> при лінійній залежності вихідного сигналу перетворювача від їх величини.

#### СПОСІБ КОМПЕНСАЦІЇ ПОЧАТКОВОГО СИГНАЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

При контролі електромагнітних властивостей радіотехнічних феромагнітних матеріалів і механічних впливів на елементи й вузли РЕА використовують електромагнітні диференціальні перетворювачі. При цьому актуальними завданнями є розробка генераторів для створення пульсуючого магнітного потоку в магнітопроводах перетворювачів, а також компенсація початкової електрорушійної сили (ЕРС) у вимірювальній обмотці. При живленні електромагнітних перетворювачів від промислової мережі стабільність напруги забезпечується застосуванням ферорезонансних стабілізаторів, осердя яких працюють у режимі насичення, при цьому форма кривої живильного струму змінюється під впливом третьої гармонійної складової.

З метою підвищення чутливості й точності вимірів електромагнітні перетворювачі повинні забезпечувати мінімальне значення початкової вихідної напруги. Через недосконалість технології виготовлення й розходження в хімічних складах матеріалів магнітопроводів перетворювачів забезпечити зазначену вимогу практично неможливо. Для компенсації початкового сигналу, тобто розбалансу між ЕРС вимірювальних обмоток, раціонально використати фазове зрушення між основними гармонійними складовими, що

викликають цей розбаланс. Компенсація досягається плавною зміною фази між вихідними імпульсами.

В ідеальному випадку повинні виконуватися умови:  $E_m' \sim E_m''$  і  $\varphi' = \varphi'' + 180^\circ$ . Реально зсув фаз досягає декількох десятків хвилин і навіть декількох градусів. Розроблений генератор, призначений для електромагнітних перетворювачів, дозволяє не тільки плавно змінювати частоту живлення, але й значно зменшувати початкову вихідну напругу перетворювача через зміну фазового зсуву вхідних імпульсів. До його складу входять генератор, що формує прямокутні імпульси невеликої тривалості (100 мкс), фазозсувний пристрій, блок узгодження, підсилювачі потужності. Для реалізації вузлів генератора застосовані сучасні схемні рішення. Виняток становить лише генератор, що задає частоту  $f$ , у якому формуються сигнали пилоподібної форми. Частота проходження імпульсів на виході генератора визначається швидкістю заряджання конденсатора до опорної напруги компаратора. Швидкість заряджання конденсатора визначається значенням керуючої напруги, що задається змінним резистором. Напруга змінюється за лінійним законом, тому що заряджання відбувається при незмінному за силою струмі. Прямокутний імпульс на виході одновібратора формується під час зворотного ходу пилоподібного сигналу. Параметри кіл підбираються таким чином, щоб тривалість прямокутного імпульсу на виході одновібратора була приблизно 250...300 мкс. Зсув за фазою вихідних імпульсів здійснюється за рахунок порівняння пилоподібної напруги з напругою керування.

Генератор з фазовим зсувом вихідних імпульсів був застосований авторами для спільної роботи з електромагнітними перетворювачами виміру зусиль та товщини покриттів і може бути рекомендований для роботи з будь-якими електромагнітними перетворювачами диференційно-трансформаторного типу. Протягом тривалого періоду експлуатації генератор показав високу надійність і стабільність роботи.

#### НЕРУЙНУЮЧИЙ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЬ ТВЕРДОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Неруйнуючі магнітні методи визначення твердості деталей відомі. Однак для деталей з незначною робочою поверхнею відомі методи контролю дають значні похибки вимірів, викликані впливом фактора, що розмагнічує, геометрії деталі та впливом магнітних полів, що поширюються в неробочих областях. Запропоновано використовувати для виміру твердості електромагнітні перетворювачі накладного типу з локалізованим магнітним потоком, при цьому точність виміру істотно підвищується. Перетворювач має П-образний магнітопровід, що виконано з трьох паралельно розташованих частин, обмотку намагнічування, яка намотана на осердя всіх трьох частин магнітопроводу, і вимірювальну, яка намотана тільки на середню його частину. Магнітний потік, створений обмоткою замикається через досліджувану деталь, а результати вимірів фіксуються вимірювальним приладом. Вплив магнітних потоків у магнітопроводі один на одного виключається,

тому що його середня частина відділена від крайніх електропровідними прокладками.

Контроль твердості ведеться в об'ємі досліджуваного об'єкта, намагніченого магнітним потоком, що проходить по середній частині магнітопроводу. Наявність коригувальних бічних потоків виключає можливість відгалуження вимірювального потоку в неробочі області деталі, що значно підвищує точність вимірів.

Магнітопровід був виготовлений з листової електротехнічної сталі типу Е330. Перетин магнітопроводу 5×10 мм, ширина активної бази 15 мм, кількість витків 100×2 і 500 для обмоток намагнічування й вимірювальної відповідно (провід ПЕВ-2 Ø0,15 мм).

Отримана математична залежність величини вихідного сигналу перетворювача від електромагнітних властивостей контрольованого матеріалу при локальному намагнічуванні сплавів РЕА (сталь 47 та інші), також отримані експериментальні залежності сигналу від твердості після термічної обробки згідно технології (активна поверхня виробу 25×30 мм).

Дослідження показали, що придатним виробам, твердість яких повинна лежати в діапазоні 53-58 одиниць відповідає значення вихідного сигналу від 70 до 150 мкА (режим термічної обробки: нагрівання під загартування в соляних ваннах при температурі 820±20°C протягом 4 хв., охолодження у маслі та воді, відпустка при температурі 200±10°C протягом 1 години). Браковані вироби лежать поза межами значень вихідного струму. При цьому частота струму намагнічування 400 Гц, а його величина 40 мА. Як показали дослідження, збільшення сили або частоти струму не приводить до помітного підвищення чутливості вимірювань, а характер передаточної залежності залишається незмінним.

Коефіцієнт кореляції між твердістю контрольованих виробів та ЕРС на виході перетворювача дорівнює 0,96, що підтверджує вірогідність контролю за допомогою застосованого перетворювача.

При переході до випробувань виробів іншої конфігурації й розмірів або виготовлених з іншого матеріалу, необхідно запропонованим розрахунком та попередніми експериментами встановлювати область вихідних напруг перетворювача для придатних виробів та перевірити метод (при масовому виробництві) за допомогою відомих методів (Брінелля або Роквелла). Для градування авторами був використаний прилад типу ТКП-1.

Результати проведених досліджень дозволяють рекомендувати обраний перетворювач та методику вимірювань для 100%-вого неруйнуючого контролю якості термічної обробки різних деталей, а сам метод контролю вважати експресним, тому що час контролю не перевищує 1 сек.

#### ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-БАЛАНСОВОГО МЕТОДУ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ОБЛАДНАННЯМ ЗА СИЛОВИМ ПАРАМЕТРОМ

Перспективним напрямком виміру силових параметрів електромагнітними (магнітопружними) перетворювачами є перехід від аналогової форми подання інформації до частотного. Останнє дозволить

підвищити розрізняльну здатність вимірів, точність, за рахунок відстройки від ряду факторів, що заважають, перешкодозахищеність при передачі інформації, спростити узгодження з ЕОМ.

Звернемося до дослідження частотно-балансового методу сило-вимірювань. Насамперед сформовано блок-схему й розглянуто процеси при струмовихровому частотно-балансовому методі. Фізичний процес, що лежить в основі методу, розглянуто на прикладі роботи модифікації найбільш відомого на цей час магнітоанізотропного перетворювача.

Розглянуто характер зміни вихідного сигналу вимірювального й компенсаційного перетворювачів при зміні частоти струму, що намагнічує. Доказано, що струмовихровий частотно-балансовий метод дозволяє практично повністю відбудуватися від коливань (девіації) значення струму, що намагнічує, а те, що вихідна інформація використовується у вигляді частоти струму, дозволяє забезпечувати авто компенсацію девіації частоти, тому що при знаходженні балансової ( $f_b$ ) частоти відхід частоти автоматично буде скомпенсований. Використання корисної інформації у вигляді частоти дозволяє ефективно застосовувати цифрові вимірювальні прилади високої точності й розв'язної здатності (порівняно з аналоговими) без попередньої обробки інформації.

Для розрахунку частоти струмовихрового балансу розглянуто електричну схему заміщення магнітного кола перетворювача.

При проведенні подальших розрахунків прийнято наступні допущення:

в основному магнітопроводі напруженість магнітного поля в усіх точках пластин відповідає лінійній ділянці залежності  $d = f(H)$ ;

по всій товщині пластин діє напруженість  $H_0$ , а нелінійний розподіл напруженості в матеріалі враховано коефіцієнтом зміни магнітної проникності  $K_d$ . Для розрахунку коефіцієнта  $K_d$  розглянуто ділянку основного магнітопроводу, обмежену шириною полюсів  $\delta$  і відстанню між ними  $\Delta$ .

Отримані графіки залежності балансової частоти від значення контрольованих зусиль ( $f_b = \varphi(\sigma)$ ) і залежності зміни вихідного сигналу вимірювального перетворювача від зусиль ( $U_d = \varphi(\sigma)$ ).

У результаті порівняння цих залежностей зроблено висновки, що при контролі зусиль частотно-балансовим методом (в межах пружних деформацій матеріалу основного магнітопроводу) на  $100 \text{ Н/м}^2$  доводиться  $\Delta f_b = 0,1$  Гц, а при контролі звичайним приладом  $0,06$  мВ. Доказано, що здатність частотного методу значно вище. Погрішність виміру зусиль частотно-балансовим методом не перевищує  $0,3\%$ , тоді як звичайним перевищує  $1\%$ . Погрішність розрахунку вихідних характеристик запропонованою методикою не перевищує  $5\%$  і може бути значно знижена за рахунок урахування енергетичних факторів при розрахунку намагніченості матеріалу магнітопроводу. Спосіб вимірювань раціонально застосовувати для цілого ряду електричних вимірів неелектричних величин.

Таким чином, розроблений метод дозволяє значно підвищити точність контролю зусиль за рахунок

великої розв'язної здатності методу. При цьому практично повністю виключається вплив коливань величини й частоти струму, що намагнічує. Метод дозволяє ефективно використовувати цифрову вимірювальну апаратуру без перетворень вихідної інформації. Відзначаючи переваги частотно-балансового методу, слід зазначити раціональність його застосування в системах керування автоматизованим устаткуванням стосовно до уже працюючих в них подібних перетворювачів.

На кафедрі ТЗЕ на цей час також проводяться цікаві дослідження способу вимірювання зусиль перетворювачами, магнітопровід яких виготовлено з ферорезини с частками однодомного феропорошку (Авторское свидетельство СССР №1517506, Способ измерения усилий магнитоупругими преобразователями. В.Ф.Безотосный и др.). Спосіб дозволяє істотно спростити технологію виготовлення перетворювачів, вони рекомендовані для контролю частоти й амплітуди вібрацій, силовимірювань при значних лінійних деформаціях об'єктів, в тому числі десантуємих, у якості тактильних матричних датчиків та інше.

## ВИСНОВКИ

Дослідження які виконали співробітники кафедри "Теоретична та загальна електротехніка" Запорізького національного технічного університету, що пов'язані з питанням контролю неелектричних та електричних параметрів матеріалів електромагнітними методами дозволяють спростити технологію виготовлення перетворювачів та підвищити точність цілого ряду електричних вимірів неелектричних величин.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Чаплыгин В.И., Безотосный В.Ф., Полянский Г.А. Токовихревой частотно - балансный метод измерения усилий электромагнитными преобразователями. // Электронное моделирование. - Киев, 1977. - С. 215 - 223.
- [2] Чаплыгин В.И., Безотосный В.Ф. Электромагнитный преобразователь усилий. // Изв. вузов. Электромеханика. - 1977. - №10. - С. 1159 - 1163.
- [3] Безотосный В.Ф., Рябошапка А.Т., Гапонов В.Н. Способ измерения усилий магнитоупругими преобразователями. А.с. СССР 1517506. Бюлл. №48, 1989.
- [4] Безотосный В.Ф., Власенко Э.В. Учет энергетических факторов при расчете намагнитченности ферромагнитных материалов. // Электротехника и электроэнергетика. - 2004. - №1. - С. 13 - 17.
- [5] Безотосный В.Ф., Козлов В.В., Набокова О.В. Современные подходы и перспективные направления разработки систем управления по силовому параметру. // Электротехника і електромеханіка. - 2008. - №3. - С. 5 - 6.

Поступила 10.07.2008

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА С ОДНОПОЗИЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ ЗАЩЕЛКОЙ

Гречко А.М.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (057) 707-62-81, e-mail: grechko@kpi.kharkov.ua.

*Проведені дослідження динамічних характеристик електромагнітного приводу з однопозиційною магнітною защілкою для вакуумного вимикача середньої напруги.*

*Проведены исследования динамических характеристик электромагнитного привода с однопозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения.*

### ВВЕДЕНИЕ

При проектировании аппаратов с электромагнитными приводами (ЭМП) об их работоспособности судят по статической тяговой характеристике электромагнита – стремятся к тому, чтобы данная характеристика на протяжении всего хода якоря располагалась выше характеристики противодействующих усилий. Однако статическая тяговая характеристика определяется при установившемся значении тока в обмотке электромагнита. В процессе перемещения подвижной системы ток будет отличаться от установившегося значения. Вследствие этого динамическое тяговое усилие отличается от статического при одном и том же положении якоря. Поэтому создание аппаратов, обладающих высокой механической и электрической износостойкостью и достаточным быстродействием, непосредственно связано с исследованием динамических процессов в них.

Расчет динамики электромагнита дает возможность установить рациональные соотношения параметров конструкции с точки зрения ее надежности и износостойкости.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На современном этапе развития электроаппаратостроения в условиях повышения мощностей электроустановок приобретает особую актуальность уменьшение потребляемой мощности аппаратов и экономия дефицитных электротехнических материалов. Применительно к ЭМП с магнитными защелками для вакуумных выключателей средних напряжений эту задачу можно сформулировать следующим образом. Требуется разработка быстродействующего ЭМП, питающегося от оперативного источника питания; причем ток, потребляемый от источника питания, необходимо снижать, а время срабатывания – уменьшать. Однако, при уменьшении тока в обмотке ЭМП, для создания МДС срабатывания необходимо увеличить число витков обмотки. Но это в свою очередь влечет за собой увеличение индуктивности обмотки и соответствующее увеличение времени срабатывания. Практика показывает, что наиболее высокое быстродействие ЭМП достигается при сравнительно малых числах витков и больших токах в обмотке. ЭМП с магнитными защелками потребляют энергию от питающей сети только при срабатывании. Поэто-

му, учитывая предъявляемые требования и опыт эксплуатации ЭМП с магнитными защелками, питание обмоток целесообразно осуществить от накопителя энергии, среди которых самым простым, доступным и дешевым является емкостной накопитель энергии (ЕНЭ). Импульсное питание обмоток позволяет уменьшить диаметр обмоточного провода, сэкономить тем самым дефицитную медь и уменьшить габариты ЭМП, обеспечив при этом необходимое значение МДС срабатывания.

В работах [1-3] была рассмотрена конструкция ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой, определены рациональные размеры магнитопровода с точки зрения развиваемой силы удержания якоря при обесточенных обмотках, установлено оптимальное значение полного времени размыкания контактов вакуумного выключателя с точки зрения минимального значения интеграла Джоуля. Таким образом, следующим этапом исследований и, соответственно, целью данной работы является: определение времен включения и отключения ЭМП; нахождение закономерности влияния различных параметров на быстродействие ЭМП; определение чувствительности времен срабатывания к этим параметрам.

### ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В общем случае динамика электромагнитов характеризуется следующими двумя уравнениями:

$$U = i \cdot R + \frac{d\psi}{dt}, \quad (1)$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F(i, \delta) - Q_c(\delta, v)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к намагничивающей обмотке;  $i$ ,  $R$ ,  $\psi$  – ток, сопротивление и потокосцепление катушки электромагнита;  $m$  – приведенная масса подвижной системы электромагнита;  $v$  – скорость подвижной системы по оси приведения массы;  $F$  – тяговое усилие электромагнита;  $\delta$  – рабочий зазор;  $Q_c$  – противодействующая сила.

Эти уравнения являются нелинейными и аналитическое решение их обычными методами не представляется возможным [4]. Различные авторы предлагают разнообразные методы расчета динамических характеристик, отличающиеся друг от друга как подходом к решению задачи, так и принятыми допуще-

ниями. В зависимости от соответствия допущений, принятых в том или ином методе расчета, реальным условиям работы электромагнита, расчетные данные могут в значительной степени отличаться от опытных. В конечном счете, адекватность принятых допущений необходимо проверить экспериментально.

Метод расчета динамических характеристик новых разрабатываемых конструкций электромагнитов должен обеспечивать возможность проведения большого объема расчетов в приемлемые сроки с целью оптимизации конструкции электромагнита и производиться путем интегрирования численными методами системы дифференциальных уравнений динамики (1).

На основании проведенного обзора методов расчета динамики электромагнитов постоянного тока в качестве базового был выбран метод, рассмотренный в [5-8]. Он основан на замене контура вихревых токов одновитковой вторичной обмоткой, сцепленной с тем же магнитным потоком, что и намагничивающая обмотка. Данный метод также исходит из предположения о полной магнитной связи первичной и вторичной обмоток, что не требует повышения порядка системы дифференциальных уравнений динамики. Основой метода является двумерная аппроксимация данных, полученных из расчета статических тяговых характеристик электромагнита  $F(F_m, \delta)$  и характеристик намагничивания  $\Phi_\psi(F_m, \delta)$  методом конечных элементов [9], например, в программной среде FEMM [10].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предмет исследования – ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой, основные размеры которого приведены в [2]. В процессе исследований установлено, что основными параметрами, оказывающими наибольшее влияние на быстродействие ЭМП, являются:

- параметры ЕНЭ (напряжение и емкость);
- обмоточные данные катушки (количество витков, диаметр провода, активное сопротивление);
- масса подвижной системы.

#### Результаты расчета процесса включения ЭМП.

**Исследование влияния параметров ЕНЭ** на время включения проводилось при следующих параметрах ЭМП:

- диаметр обмоточного провода, количество витков и активное сопротивление включающей обмотки:  $d_m = 0,5$  мм;  $w = 460$ ,  $R = 8$  Ом соответственно.
- масса подвижной системы  $m = 12$  Н.

В качестве варьируемых величин принимались напряжение и емкость ЕНЭ. В результате численных экспериментов построены зависимости времени включения и максимальной скорости якоря при включении ЭМП от параметров ЕНЭ, представленные на рис. 1. Необходимость в определении скорости перемещения якоря обусловлена ограничением средней скорости перемещения механически связанной с ним подвижных контактов вакуумной дугогасительной камеры (ВДК), связанное с относительно невысокой механической износостойкостью сильфона ВДК. На сегодняшний день мировыми лидерами в области вакуумных технологий (ABB, Siemens) предлагаются ВДК со средней скоростью перемещения подвижных контактов в пределах 1,8-2,0 м/с [11, 12]. Зависимости

на рис. 1 показывают, что увеличение емкости ЕНЭ и напряжения питания уменьшают время включения ЭМП и увеличивают скорость перемещения подвижных частей. Такая зависимость более выражена в отношении напряжения питания. Однако произвольно выбрать напряжение и емкость ЕНЭ невозможно.

Во-первых, оперативное напряжение, подаваемое на блок системы управления вакуумным выключателем, фиксировано (в ячейках комплектных распределительных устройств используется либо питание от переменного тока 220 В с двухполупериодным выпрямлением, либо от постоянного тока 110 В или 220 В [13]). Необходимость же увеличения подаваемого на катушку ЭМП напряжения с помощью специальных схем (например, при питании цепей управления переменным током – с помощью повышающего трансформатора; постоянным током – с помощью специальных преобразователей со стабилизацией напряжения на ЕНЭ) может быть связана с необходимостью обеспечить цикл быстродействующего автоматического повторного включения (БАПВ) в соответствии с ГОСТ 687-78 [14]. Во-вторых, величина емкости ЕНЭ должна обеспечивать надежную работу ЭМП и выполнение им возлагаемых на него функций.

Из вышесказанного следует, что при проектировании электромагнита необходимо подобрать такую минимальную емкость ЕНЭ, которая обеспечит заданное быстродействие ЭМП при заданном значении питающего напряжения.

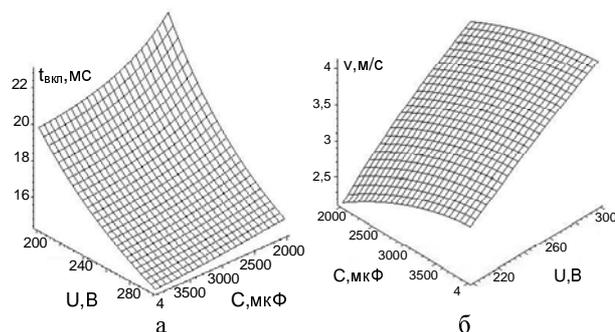


Рис. 1. Зависимость времени включения (а) и максимальной скорости якоря (б) при включении от параметров ЕНЭ

**Исследование влияния обмоточных данных включающей обмотки** на время включения ЭМП проводилось при следующем значении напряжения и емкости ЕНЭ:  $U_{c0} = 270$  В и  $C = 2000$  мкФ.

В качестве варьируемых величин принимались следующие параметры включающей обмотки: диаметр обмоточного провода  $d_m$ ; количество витков  $w$ ; активное сопротивление  $R$ . По результатам численных исследований построены зависимости времени включения ЭМП от обмоточных данных включающей обмотки, приведенные на рис. 2-5.

Кроме того, были проведены исследования по определению зависимости времени включения ЭМП и максимальной скорости якоря от массы подвижной системы. Результаты исследований показали монотонное возрастание времени включения и монотонное убывание максимальной скорости якоря при увеличении массы подвижной системы.

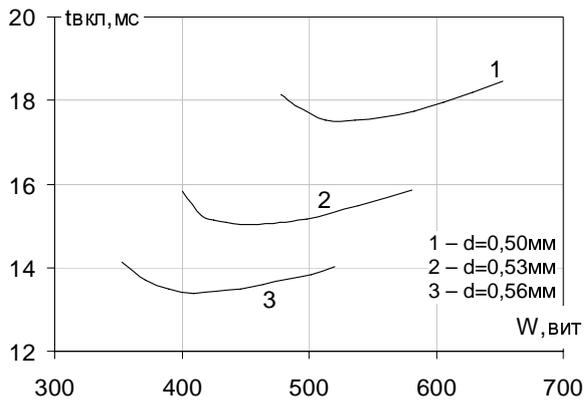


Рис. 2. Зависимость времени включения от количества витков для различных диаметров обмоточного провода

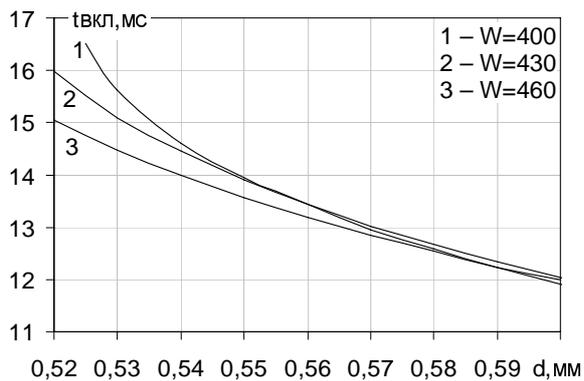


Рис. 3. Зависимость времени включения от диаметра обмоточного провода для различного количества витков

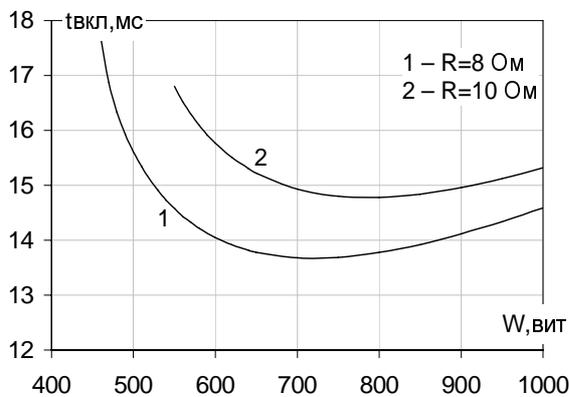


Рис. 4. Зависимость времени включения от количества витков для различного активного сопротивления обмотки

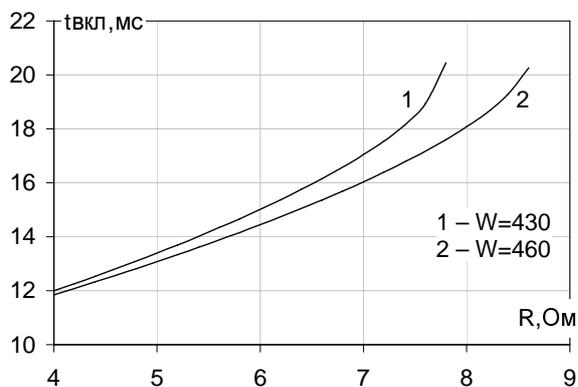


Рис. 5. Зависимость времени включения от активного сопротивления обмотки для различного количества витков

### Результаты расчета процесса отключения ЭМП.

Целью расчета процесса отключения ЭМП является поиск таких параметров ЕНЭ, обмоточных данных катушки и массы подвижной системы, при которых будет обеспечено найденное в [3] оптимальное с точки зрения минимума интеграла Джоуля время отключения вакуумного выключателя (22 мс). При этом необходимо учитывать, что данное время включает в себя, наряду с собственным временем размыкания выключателя, время реагирования релейной защиты и автоматики выключателя, которое лежит в пределах 10-12 мс. Таким образом, для обеспечения минимального значения интеграла Джоуля время отключения ЭМП не должно превышать 10 мс. Следовательно, задачами проведения численного исследования являются, во-первых, поиск таких значений перечисленных выше факторов, при которых обеспечивается требуемое время отключения, во-вторых, определение чувствительности времени отключения к изменению значений данных факторов.

**Исследование влияния параметров ЕНЭ** на время отключения проводилось при следующих параметрах ЭМП:

- диаметр обмоточного провода, количество витков и активное сопротивление отключающей обмотки:  $d_m = 0,25$  мм;  $w = 460$ ,  $R = 38$  Ом соответственно.
- масса подвижной системы  $m = 12$  Н.

Зависимость времени отключения при изменении параметров ЕНЭ показана на рис. 6. В результате численных экспериментов установлено, что изменение параметров ЕНЭ при отключении ЭМП и фиксированной массе подвижной системы мало влияет на максимальную скорость якоря, которая составляет приблизительно 5,3 м/с. Данный факт связан с принципом отключения ЭМП за счет воздействия отключающей и контактной пружин [1].

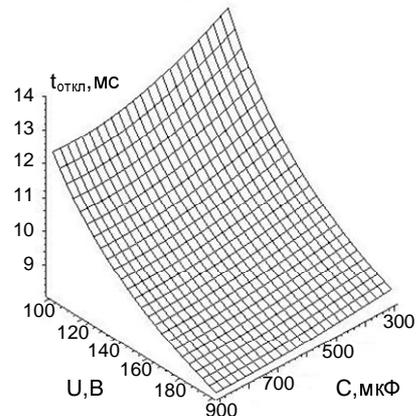


Рис. 6. Зависимость времени отключения от параметров ЕНЭ

**Исследование влияния обмоточных данных отключающей обмотки** на время отключения ЭМП проводилось при следующем напряжении и емкости ЕНЭ:  $U_{c0} = 270$  В и  $C = 300$  мкФ соответственно.

По результатам численных исследований построены зависимости времени отключения ЭМП от обмоточных данных отключающей обмотки, приведенные на рис. 7-10.

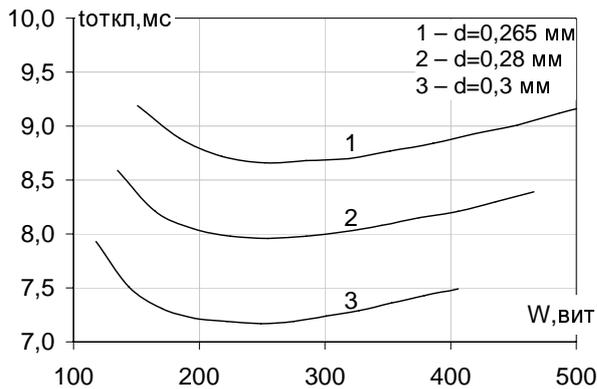


Рис. 7. Зависимость времени отключения от количества витков для различных диаметров обмоточного провода

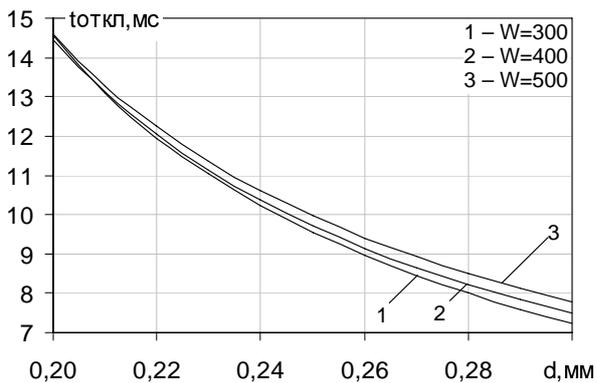


Рис. 8. Зависимость времени отключения от диаметра обмоточного провода для различного количества витков

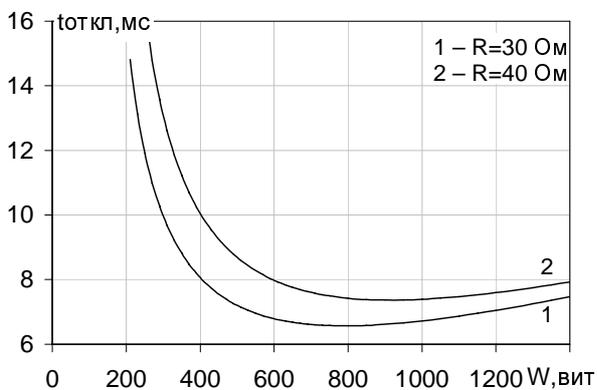


Рис. 9. Зависимость времени отключения от количества витков для различного активного сопротивления обмотки

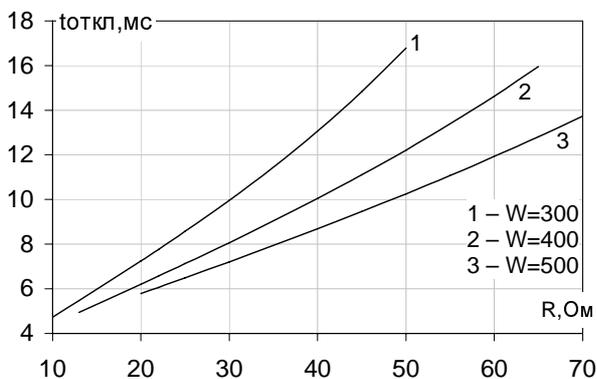


Рис. 10. Зависимость времени отключения от активного сопротивления обмотки для различного количества витков

Также были проведены исследования по определению зависимости времени отключения ЭМП и максимальной скорости якоря от массы подвижной системы. Как и для процесса включения, установлено монотонное возрастание времени отключения и монотонное убывание максимальной скорости якоря при увеличении массы подвижной системы. Однако, в отличие от процесса включения, отсутствует влияние параметров ЕНЭ на скорость перемещения подвижных частей ЭМП при отключении от их массы, что, опять же, связано с принципом отключения ЭМП.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1. Увеличение емкости и напряжения питания ЕНЭ уменьшают время включения ЭМП и увеличивают скорость перемещения подвижных частей. Данная зависимость более выражена в отношении напряжения питания.

2. На время отключения ЭМП в большей степени влияет напряжение источника питания по сравнению с величиной емкости ЕНЭ. Однако изменение параметров ЕНЭ практически не влияет на скорость перемещения подвижных частей при отключении, что связано с принципом отключения ЭМП за счет воздействия отключающей и контактной пружин.

3. Установлена немонотонная зависимость между временами срабатывания ЭМП и обмоточными данными соответствующих обмоток, позволяющая сделать вывод о существовании оптимальных обмоточных данных с точки зрения минимального времени срабатывания ЭМП.

В работах [15-16] было теоретически предположено и экспериментально подтверждено наличие некоторой оптимальной индуктивности, которая обеспечивает минимальное время срабатывания быстродействующего электромагнита постоянного тока. При проведении численных и экспериментальных исследований на данном электромагните величина начального рабочего зазора принималась равной 2 мм. При столь малых изменениях рабочего зазора для случая быстродействующего электромагнита автор говорит о том, что тяговая сила, развиваемая электромагнитом  $F$  при прочих равных условиях пропорциональна индуктивности  $L$  [15, 17]:

$$F = -\frac{1}{2} \cdot (i \cdot w)^2 \cdot \frac{d\Lambda}{d\delta} = -\frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\delta}, \quad (2)$$

где  $\Lambda = L / w^2$  – магнитная проводимость рабочего зазора.

В [15-16] сделан вывод о том, что с увеличением индуктивности при неизменной противодействующей силе увеличивается результирующая тяговая сила электромагнита, то есть уменьшается его время срабатывания. С другой стороны, увеличение индуктивности приводит к уменьшению величины тока в каждый данный момент времени, что ведет к уменьшению тяговой силы, то есть к увеличению времени срабатывания. Необходимо также отметить, что исследования в указанных работах проводились без учета влияния вихревых токов в магнитопроводе (магнитная система выполнялась шихтованной).

Отличие результатов, полученных в данной ра-

боте, от результатов, приведенных в [15-16], заключается в том, что в ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой магнитопровод изготовлен цельным, начальный рабочий зазор существенно больше (12 мм), при расчетах было учтено влияние вихревых токов.

4. Из полученных зависимостей следует, что для каждого значения диаметра обмоточного провода  $d_m$  существует экстремальное значение числа витков  $w$ . Влияние этих величин на время срабатывания ЭМП различное. Изменение числа витков меняет индуктивность и постоянную времени разряда  $R$ ,  $L$ ,  $C$  контура. С ростом  $w$  растут и  $R$ , и  $L$ , и  $\tau$  – постоянная времени; с уменьшением  $w$  – последние уменьшаются. С изменением диаметра провода практически не меняется индуктивность, но меняется активное сопротивление  $R$  и постоянная времени  $\tau$ .

5. В процессе расчета могут быть найдены такие значения диаметра провода и числа витков обмоток, которые при заданных массе подвижной системы, противодействующей силе, рабочем ходе и минимальных параметрах ЕНЭ обеспечат требуемое время срабатывания ЭМП.

### ВЫВОДЫ

1. В работе проведены исследования динамических характеристик ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения, в ходе которых установлено, что основными параметрами, оказывающими наибольшее влияние на быстродействие ЭМП, являются емкость и напряжение ЕНЭ, обмоточные данные катушки (количество витков, диаметр провода, активное сопротивление) и масса подвижной системы.

2. Как на время включения, так и на время отключения ЭМП в большей степени оказывает влияние напряжение источника питания по сравнению с величиной емкости ЕНЭ.

3. Включающая и отключающая обмотки ЭМП работают в импульсном режиме только в момент срабатывания, что позволяет применить систему форсированного управления с использованием ЕНЭ. Для обеспечения цикла БАПВ возможно применение специальных схем повышения напряжения.

4. ЭМП требует незначительной энергии для "сброса" магнитной защелки. Это позволяет использовать для отключения вакуумного выключателя ЕНЭ с низкими номинальными параметрами. В ходе предварительных экспериментальных исследований установлено, что минимально необходимыми значениями для гарантированного срабатывания опытного образца ЭМП являются следующие параметры ЕНЭ:

- для операции включения: 270 В и 2000 мкФ;
- для операции отключения 40 В и 300 мкФ.

5. Установлена немонотонная зависимость времен включения и отключения ЭМП от обмоточных данных соответствующих обмоток.

6. В зависимости от требуемого времени срабатывания ЭМП вакуумного выключателя могут быть рассчитаны емкость и напряжение ЕНЭ, а также обмоточные данные катушки.

7. В ходе предварительных экспериментальных

исследований установлены параметры ЕНЭ и обмоточные данные катушки, при которых время включения и отключения ЭМП составило 13,2 мс и 8,9 мс соответственно.

8. Для проверки достоверности используемого метода численного расчета динамических характеристик ЭМП и оценки погрешности полученных результатов необходимо проведение экспериментальных исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клименко Б.В., Гречко А.М., Выровец С.В., Бугайчук В.М. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника и электромеханика. 2006. № 4. С. 22-26.
- [2] Гречко А.М., Бугайчук В.М. Исследование и расчет размеров магнитопровода электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой // Электротехника и электромеханика. 2008. № 2. С. 15-20.
- [3] Клименко Б.В., Байда Е.И., Гречко А.М., Боев С.В. О термическом действии токов коротких замыканий в электрических цепях средних напряжений, защищаемых вакуумными выключателями // Электротехника и электромеханика. – 2007. - № 1. С. 30-33.
- [4] Тер-Акопов А.К. Анализ методов расчета динамических характеристик электромагнитных механизмов // Труды МАИ, вып. 85. Оборонгиз, 1957. С. 48-71.
- [5] Клименко Б.В. Алгоритм машинного расчета динамики электромагнитов постоянного тока. – В кн.: Низковольтное аппаратостроение. Чебоксары: ВНИИР, 1978, вып. 5.
- [6] Клименко Б.В. Интегрирование уравнений динамики электромагнитов при наличии вторичных контуров // Электричество. 1984. №11. С. 52-55.
- [7] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.
- [8] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы электрических аппаратов. Дисс. докт. техн. наук. - Харьков, 1994. – 197 с.
- [9] Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
- [10] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. Version 3.3. <http://femm.berlios.de>.
- [11] ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH. Каталог АБВ. VD4 – вакуумный выключатель среднего напряжения для первичного распределения.
- [12] Siemens Vacuum-Interrupter VS 12031 Specification.
- [13] Будовский А.И., Иванов В.П. Разработки и исследования вакуумных выключателей на напряжение 6-35 кВ // Электротехника. 1998. №1. С. 36-38.
- [14] ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжении свыше 1000 В. Общие технические условия.
- [15] Тер-Акопов А.К. Оптимальная индуктивность и минимальное время срабатывания электромагнитов постоянного тока // Труды МАИ, вып. 85. Оборонгиз, 1957. С. 41-47.
- [16] Тер-Акопов А.К. Экспериментальное исследование времени срабатывания электромагнитов постоянного тока // Вестник электропромышленности. 1959. № 4. С. 38-42.
- [17] Основы теории электрических аппаратов / И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др.; Под ред. И.С. Таева. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

Поступила 04.06.2008

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОМ УПРАВЛЯЕМОМ ВЫПРЯМИТЕЛЕ - ИСТОЧНИКЕ ТОКА В СИСТЕМЕ ПУСКА АСИНХРОННЫХ МАШИН

Жемеров Г.Г., д.т.н., проф., Колесник В.Ю.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника"

тел. (057) 7076609, (057) 7076312, E-mail: zhemerov@online.kharkiv.net

*В статье рассмотрено применение активного управляемого выпрямителя – источника тока в системе пуска асинхронных двигателей на основе автономного инвертора тока. Получены соотношения для определения напряжений и токов в элементах входного фильтра активного выпрямителя тока. Проанализирована форма кривой выходного напряжения активного выпрямителя.*

*У статті розглянуто застосування активного керуваного випрямляча – джерела струму в системі пуску асинхронних двигунів на основі автономного інвертора струму. Отримані співвідношення для визначення напруг і струмів в елементах вхідного фільтру активного випрямляча струму. Проаналізована форма кривої вихідної напруги активного випрямляча.*

### ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей с питающей сетью в ряде случаев делают невозможным прямое подключение преобразователя частоты к сети. Решение проблемы может быть получено за счет включения на входе преобразователя активного управляемого выпрямителя. На входе преобразователя на основе автономного инвертора тока необходимо использовать активный управляемый выпрямитель – источник тока.

В статье рассматриваются следующие вопросы: синтез системы управления активным выпрямителем тока, анализ кривой выходного напряжения активного выпрямителя тока и особенности перевода системы пуска в режим передачи энергии из нагрузки в сеть.

### СИСТЕМА ПУСКА АМ НА ОСНОВЕ АУВИТ и АИТ

Специфика векторного управления асинхронной машиной (АМ) в системе активный управляемый выпрямитель источник тока (АУВИТ) – автономный инвертор тока (АИТ), показанной на рис. 1, заключается в том, что с помощью АИТ изменяется частота тока статора, а с помощью АУВИТ – амплитуда тока статора. Система векторного управления АМ (СУ АМ) вырабатывает для системы управления АУВИТ сигнал, пропорциональный требуемому значению модуля тока статора  $I_d^*$ , который сравнивается с фактическим током  $I_d$ . Разностный сигнал проходит через регулятор тока РТ. Сигналы задания по токам фаз  $i_{abc}^*$  получаются перемножением сигнала с выхода регулятора на соответствующие фазные напряжения  $u_{abc}$ .

### СТРУКТУРА АУВИТ

Силовая схема АУВИТ приведена на рис. 2. Схема содержит фазную индуктивность  $L$ , равную сумме индуктивности рассеяния сетевого трансформатора и кабелей, фильтровые конденсаторы  $C$  на стороне переменного напряжения, шесть запираемых тиристоров VS1-VS6, включенных по мостовой схеме и два выходных реактора  $L_d$ , образующих индуктив-

ный выходной фильтр.

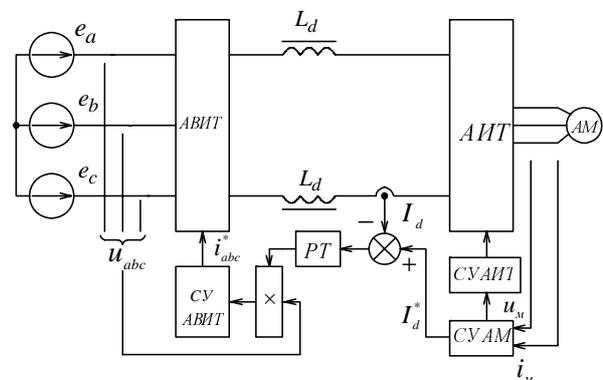


Рис. 1. Силовая схема и структура СУ АУВИТ-АИТ

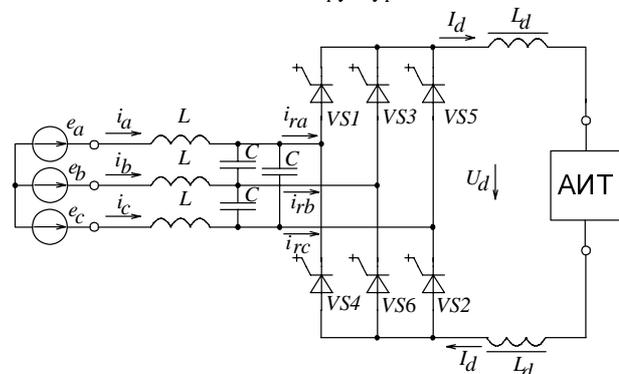


Рис. 2. Схема АУВИТ

Токи на входе коммутатора  $i_r$  имеют большое значение  $di/dt$ , а сеть носит индуктивный характер, поэтому на входе коммутатора необходим емкостный фильтр, шунтирующий сеть.

Однополярность выходного тока  $I_d$  и биполярность выходного напряжения  $U_d$  определяет тип силовых ключей как униполярные ключи, блокирующие обратное напряжение. При низких частотах ШИМ используются GTO, а при более высоких частотах следует использовать транзисторы типа IGBT.

Формирование синусоидального тока в сети осуществляется путем переключения ключей коммутатора с высокой частотой. При этом в периоде ШИМ

постоянный ток нагрузки либо распределяется между фазами сети либо замыкается коммутатором. Очевидно, что импульсный ток нагрузки вызывает пульсации напряжения на конденсаторах фильтра.

Возможны два варианта подключения конденсаторов: 1) соединение по схеме звезда; 2) соединение по схеме треугольник. Рассмотрим эти варианты и определим, в каком случае пульсации напряжения на конденсаторах, обусловленные импульсами тока от коммутатора, будут меньше.

При соединении конденсаторов фильтра в треугольник действующее значение тока через конденсатор  $I_{c\Delta}$ , к которому прикладывается линейное напряжение сети, будет равно:

$$I_{c\Delta} = U_{л} \omega_s C_{\Delta}, \quad (1)$$

где  $U_{л}$  – действующее значение линейного напряжения сети;  $\omega_s$  – угловая частота тока сети.

А действующее значение фазного тока в сети определяется из следующего соотношения:

$$I_{s\Delta} = \sqrt{3} U_{л} \omega_s C_{\Delta}. \quad (2)$$

Рассмотрим интервал времени, в котором открыты и проводят ток тиристоры VS1 и VS2. В этом случае ток нагрузки  $I_d$  распределяется между конденсаторами следующим образом. Через конденсатор, подключенный к клеммам фаз  $a$  и  $c$ , протекает ток равный  $2I_d/3$ , а через два других конденсатора протекает ток  $I_d/3$ . В интервале времени, когда открыты тиристоры VS1 и VS6, ток распределится так, что через конденсатор, подключенный к клеммам фаз  $a$  и  $b$ , протекает ток равный  $2I_d/3$ , а через два других конденсатора протекает ток  $I_d/3$ . Полярность тока в конденсаторах, подключенных между клеммами  $a$  и  $b$  и  $a$  и  $c$  остается неизменной. Таким образом, средний ток в периоде ШИМ, вызывающий пульсации напряжения в конденсаторах фильтра, равен  $I_d/2$ . Провал напряжения на конденсаторе, вызванный протеканием этого тока, определяется согласно следующему соотношению:

$$\Delta U_{\Delta} = I_d \Delta t / 2C_{\Delta}, \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени протекания тока.

При соединении конденсаторов фильтра в звезду ток в сети определяется из соотношения:

$$I_{s\Delta} = U_{л} \omega C_{\Delta} / \sqrt{3}. \quad (4)$$

Ток нагрузки при открытии двух тиристоров в вентильных группах всегда замыкается через два включенных конденсатора фильтра. Таким образом, провал напряжения на двух последовательно включенных конденсаторах составляет:

$$\Delta U_{\Delta} = 2I_d \Delta t / C_{\Delta}. \quad (5)$$

Для определения оптимальной с точки зрения величины изменения напряжения на конденсаторах схемы приравняем токи в сети и определим соотношение между емкостями конденсаторов, поделив (2) на (4), получим:

$$C_{\Delta} = 3C_{\Delta} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) и поделив на (3) получим

$$\Delta U_{\Delta} / \Delta U_{\Delta} = 4/3 \quad (7)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что при одинаковом значении тока в сети в случае включения конденсаторов фильтра по схеме треугольника пульсации напряжения на конденсаторах меньше, чем при включении конденсаторов в звезду.

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АУВИТ

Система управления АУВИТ должна быть построена таким образом, чтобы в любой момент времени для обеспечения пути тока  $I_d$  было открыто только два ключа – один в анодной вентильной группе и один в катодной. Недопустимо одновременное открытие двух или трех ключей в одной вентильной группе, поскольку открытые ключи замкнут накоротко один или несколько фильтровых конденсаторов  $C$ . Существует 9 допустимых состояний открытых ключей, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Допустимые состояния ключей в АУВИТ

Номер	Открытые ключи	$i_{ra}$	$i_{rb}$	$i_{rc}$
1	VS1, VS2	$I_d$	0	$-I_d$
2	VS2, VS3	0	$I_d$	$-I_d$
3	VS3, VS4	$-I_d$	$I_d$	0
4	VS4, VS5	$-I_d$	0	$I_d$
5	VS5, VS6	0	$-I_d$	$I_d$
6	VS6, VS1	$I_d$	$-I_d$	0
7	VS1, VS4	0	0	0
8	VS3, VS6	0	0	0
9	VS5, VS2	0	0	0

Известно несколько способов модуляции, учитывающих приведенные выше требования к состоянию ключей [1]. В данной статье рассматривается векторная модуляция с ШИМ с постоянной частотой переключения тиристоров. [2] Рассмотрим работу СУ АВИТ подробнее.

На рис. 3 представлена векторная диаграмма токов сети.

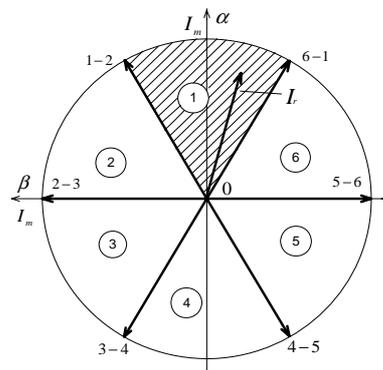


Рис. 3. Векторная диаграмма токов сети

Векторы 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-1 соответствуют состояниям 1-6 из табл. 1. В каждом из секторов, для формирования токов сети можно использовать только три состояния, например, если вектор тока  $I_r$  находится в секторе 1, то для ненулевых состояний токов сети открытыми могут быть ключи VS1, VS6 и VS2. В

качестве нулевого состояния целесообразно выбрать состояние 7. Таким образом, в секторе 1 открытыми могут быть тиристоры VS1 и VS2, VS4, VS6. Аналогично для остальных интервалов допустимые комбинации открытых ключей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Допустимые состояния открытых ключей

Номер сектора	Открытые ключи	
	анодная группа	катодная группа
1	VS1,	VS2, VS4, VS6
2	VS1, VS3, VS5	VS2
3	VS3	VS2, VS4, VS6
4	VS1, VS3, VS5	VS4
5	VS5	VS2, VS4, VS6
6	VS1, VS3, VS5	VS6

Рассмотрим практическую реализацию такой системы. Разделим период сетевого напряжения на шесть интервалов, соответствующих секторам 1-6, так, как показано на рис. 4. Причем сектор 1 соответствует фазе напряжения фазы  $a$  от  $\pi/3$  до  $2\pi/3$ , то есть, обобщенный вектор напряжения сети совпадает с обобщенным вектором тока сети. Для формирования требуемых значений фазных токов в каждом интервале используется один и тот же алгоритм.

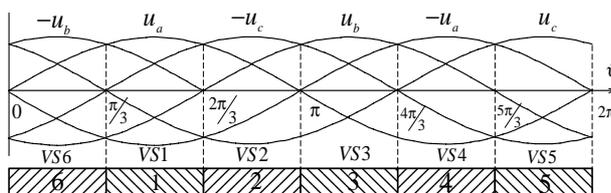


Рис. 4. Интервалы переключения тиристоров

Рассмотрим интервал 1, в котором максимально фазное напряжение фазы  $a$  и максимально анодное напряжение тиристора VS1. Ток фазы  $a$  в этом интервале положителен и превышает токи в других фазах. Поэтому в интервале 1 постоянно открыт тиристор VS1, подключающий положительный вывод нагрузки к фазе  $a$ . Для регулирования токов фаз необходимо попеременно переключать тиристоры VS2, VS4, VS6. Если открыт тиристор VS4, то ток нагрузки замыкается через тиристоры VS1 и VS4, выходное напряжение равно нулю. Если открыт тиристор VS6, то на выходе АУВИТ действует линейное напряжение  $u_{ab}$ , а если открыт тиристор VS2 – линейное напряжение  $u_{ac}$ .

Для дальнейшего рассмотрения алгоритма переключения тиристоров введем коэффициенты заполнения фазных токов, равные отношению текущего значения модуля тока задания соответствующей фазы  $|i_{sabc}|$  к максимальному фазному току сети  $I_{sm}$ :

$$\begin{cases} k_a = |i_{sa}|/I_{sm} \\ k_b = |i_{sb}|/I_{sm} \\ k_c = |i_{sc}|/I_{sm} \end{cases} \quad (8)$$

СУ АУВИТ построена по принципу вертикального управления, то есть управляющие импульсы для тиристоров вырабатываются в моменты равенства сигнала управления и сигнала задания, как показано

на рис. 5. В качестве опорного сигнала используется пилообразный сигнал, амплитуда которого определяет максимальное значение тока сети  $I_{sm}$ . Опорный сигнал сравнивается с сигналами задания по токам для фаз  $a$  и  $b$ , которые представляют собой модули токов соответствующих фаз.

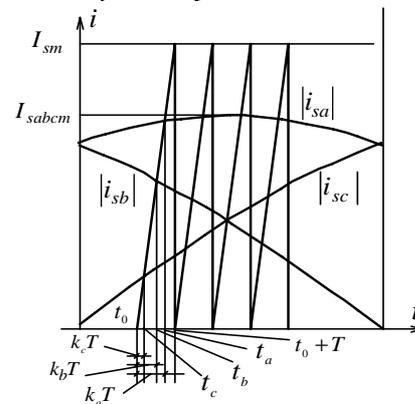


Рис. 5. Формирование интервалов работы тиристоров

Пересечению опорного сигнала с сигналом тока задания фазы  $a$  соответствует момент времени  $t_a$ . Поскольку развертка линейная, то справедливы следующие соотношения:

$$(t_a - t_0)/T = |i_{sa}|/I_{sm} \quad (9)$$

Аналогично для фазы  $b$ :

$$(t_b - t_0)/T = |i_{sb}|/I_{sm} \quad (10)$$

Можно показать, что

$$(t_c - t_0)/T = |i_{sc}|/I_{sm} \quad (11)$$

Таким образом, импульсы управления тиристорами VS2, VS4, VS6 вырабатываются в моменты пересечения опорного сигнала с сигналами задания по токам для фаз  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

Тиристор VS4, регулирующий среднее значение тока фазы  $a$  на периоде ШИМ, должен быть открыт в интервале длительностью  $t_{VS4} = (1 - k_a)T$  в конце периода. В интервале времени  $k_a T$  должен быть открыт VS6, регулирующий среднее значение тока фазы  $b$  на периоде ШИМ, или VS2, регулирующий среднее значение тока фазы  $c$  на периоде ШИМ. Длительность открытого состояния VS6 определяется через коэффициент фазы  $b$  –  $t_{VS6} = k_b T$ , а длительность открытого состояния VS2 через коэффициент фазы  $c$  –  $t_{VS2} = k_c T$ .

Аналогично в интервале 2 постоянно открыт тиристор VS2, а переключаются тиристоры VS1, VS3, VS5. Тиристор VS5 обеспечивает управление средним значением тока фазы  $c$ , а тиристоры VS1, VS3 – средними значениями токов фаз  $a$  и  $b$ .

Схема работает аналогично во всех шести интервалах, изменяются только номера открытых тиристоров. Следовательно, выходное напряжение АУВИТ повторяется с частотой  $6\omega_s$  и имеет низкочастотный период повторяемости  $T_d = \pi/3\omega_s$ , в котором, в свою очередь, можно выделить высокочастотный период повторяемости ШИМ –  $T$ .

## АНАЛИЗ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АУВИТ

Получим выражения, для определения среднего значения выходного напряжения АУВИТ в низкочастотном интервале повторяемости, приняв следующие допущения:

1 Напряжения на конденсаторах фильтра совпадают по фазе и амплитуде с линейными напряжениями сети (пренебрегаем падением напряжения на индуктивности сети).

2 Ток нагрузки, замыкаясь через конденсаторы фильтра достаточно большой емкости, не приводит к пульсациям напряжения на входе коммутатора.

Формирование выходного напряжения АУВИТ на низкочастотном интервале повторяемости показано на рис. 6. Для примера рассмотрим первый сектор см. рис. 3.

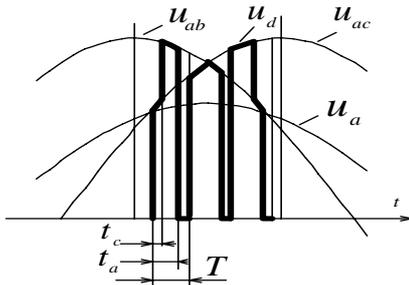


Рис. 6. Формирование выходного напряжения АУВИТ

В каждом из интервалов ШИМ длительностью  $T$  выделяются три интервала:

1. Интервал длительностью  $t_c$ , в течение которого открыты ключи VS1 и VS6, выходное напряжение  $u_d = u_{ac}$ .

2. Интервал длительностью  $t_a - t_c$ , в течение которого открыты ключи VS1 и VS2, выходное напряжение  $u_d = u_{ab}$ .

3. Интервал длительностью  $T - t_a$ , в течение которого открыты ключи VS1 и VS4, выходное напряжение  $u_d = 0$ .

Среднее напряжение за период ШИМ можно определить как сумму двух интегралов согласно следующему соотношению:

$$u_d = \frac{1}{T} \left( \int_t^{k_c T + t} u_{ac}(t) dt + \int_{k_c T + t}^{k_a T + t} u_{ab}(t) dt \right). \quad (12)$$

Определим значения коэффициентов  $k_a$ ,  $k_c$  в функции времени.

Коэффициент  $k_a$  можно определить следующим образом:

$$k_a = |i_{sa}^*| / I_{sm} = |I_{sam} \sin(\omega_s t)| / I_{sm}, \quad (13)$$

где  $I_a$  – амплитуда тока фазы  $a$ .

Аналогично для коэффициента  $k_b$

$$k_c = |i_{sc}^*| / I_{sm} = |I_{scm} \sin(\omega_s t - 4\pi/3)| / I_{sm}. \quad (14)$$

Тогда среднее напряжение в периоде ШИМ можно определить как сумму двух интегралов:

$$u_d = \frac{1}{T} \left( \frac{I_{sbm}^* \sin(\omega_s t - 4\pi/3) T + t}{I_{sm}} \int U_{lm} \sin(\omega_s t - \pi/6) dt + \frac{I_{sam}^* \sin(\omega_s t) T + t}{I_{sm}} \int U_{lm} \sin(\omega_s t + \pi/6) dt \right). \quad (15)$$

Выполняя операцию интегрирования, получим для среднего значения выходного напряжения в интервале ШИМ следующее выражение:

$$U_d = \frac{U_{sm}}{\omega_s T} \left( \cos(\omega_s t - \pi/6) - \cos\left(\omega_s \left(\frac{I_{sb} \sin(\omega_s t - 4\pi/3) T}{I_{sm}} + t\right) - \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(\omega_s \left(\frac{I_{sb} \sin(\omega_s t - 4\pi/3) T}{I_{sm}} + t\right) + \frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(\omega_s \left(\frac{I_{sa} \sin(\omega_s t) T}{I_{sm}} + t\right) + \frac{\pi}{6}\right) \right). \quad (16)$$

Для анализа выражения (16) примем допущение, что в интервале периода ШИМ амплитуды сигнала задания в фазах  $a$ ,  $b$  и  $c$  постоянны. Тогда

$$U_d = \frac{U_{sm}}{\omega_s T} \left( \cos(\omega_s t - \pi/6) - \cos(\omega_s (k \sin(\omega_s t - 4\pi/3) T + t) - \pi/6) + \cos(\omega_s (k \sin(\omega_s t - 4\pi/3) T + t) + \pi/6) - \cos(\omega_s (k_a \sin(\omega_s t) T + t) + \pi/6) \right). \quad (17)$$

Выражение (17) справедливо для периода повторяемости ШИМ. Для определения среднего значения напряжения в интервале  $T_d$  необходимо просуммировать средние значения выходного напряжения АУВИТ в периодах ШИМ и поделить на число периодов ШИМ в периоде  $T_d$ .

$$U_{dav} = \sum_{k=1}^{T_d/T} U_{dk}. \quad (18)$$

Анализируя (17), можно сделать вывод, что единственным регулируемым параметром является отношение амплитуды сигнала задания по выходному току к максимальному значению выходного тока  $k$ .

На практике напряжение на конденсаторах фильтра отличается по форме от напряжения в сети. Для уменьшения высокочастотных пульсаций напряжения на конденсаторах фильтра, вызванных током нагрузки, необходимо повышать их емкость, однако при этом повышается емкостной ток, потребляемый из сети, и возрастает падение напряжения на индуктивности сети. Кроме того, емкость конденсаторов ограничивается из соображений недопустимости резонанса на частотах сети и ШИМ.

Ток в сети  $i_s$  представляет собой сумму  $i_s = i_l + i_c$ , где  $i_l$  – активный ток, то есть ток, формируемый АУВИТ, совпадающий по фазе с напряжением сети,  $i_c$  – ток, потребляемый конденсаторами фильтра емкостного характера. Таким образом, суммарный фазный ток сети опережает фазное напряжение на угол  $\varphi = \arctg(i_c / i_l)$ , причем действующее значение тока сети равно  $I_s = \sqrt{I_l^2 + I_c^2}$ . Угол  $\varphi$  при

номинальном токе нагрузки, как правило, не превышает 20 электрических градусов, это ограничивает максимальное значение емкости конденсаторов фильтра. Если пренебречь индуктивностью сети  $L$  (а это возможно, поскольку индуктивное сопротивление на частоте сети существенно меньше емкостного), то максимальное значение емкости равно

$$C = \frac{P_l \operatorname{tg}(\varphi_{\max})}{3U_{\text{лм}}^2 \omega_s} \quad (19)$$

При  $P_l = 630 \text{ kW}$ ,  $\varphi_{\max} = \pi/9$ ,  $U_{\text{лм}} = 8.46 \text{ kV}$  получаем  $C = 3,4 \text{ }\mu\text{F}$ .

Рассмотрим искажения напряжения на конденсаторе, обусловленные падением напряжения на индуктивности сети.

В общем случае при произвольном значении угла  $\varphi$  выражение для амплитуды напряжения на конденсаторах имеет вид:

$$U_{Cm} = \sqrt{U_{\text{лм}}^2 + U_{L\Sigma}^2 + 2U_{\text{лм}}U_{L\Sigma} \sin \varphi}, \quad (20)$$

где  $U_{L\Sigma} = \sqrt{3}I_s \omega_s L$ , а выражение для угла сдвига напряжения на конденсаторе относительно соответствующего линейного напряжения сети:

$$\delta = \arcsin(\cos \varphi * U_{L\Sigma} / U_C). \quad (21)$$

Перейдем к относительным единицам, приняв за базис амплитудное значение линейного напряжения сети  $U_{\text{лм}}$ . Обозначим  $g = \sqrt{3}I_s \omega_s L / U_{\text{лм}}$ . Тогда:

$$U_{L\Sigma}^* = g. \quad (23)$$

Выражение (20) примет вид:

$$U_{Cm}^* = \sqrt{1 + g^2 + 2g \sin \varphi}, \quad (24)$$

а выражение (21) примет вид:

$$\delta = \arcsin \left( \frac{g \cos \varphi}{\sqrt{1 + g^2 + 2g \sin \varphi}} \right). \quad (25)$$

На рис. 7 приведены графики зависимости относительного напряжения на конденсаторах фильтра  $U_{C^*}$  от параметра  $g$  при значениях угла  $\varphi$   $\pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$ . На рис. 8 приведены графики зависимости угла сдвига напряжения на конденсаторах фильтра, относительно соответствующего линейного напряжения сети от  $g$  при значениях угла  $\varphi$   $\pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$ .

Рассмотрим влияние пульсаций тока нагрузки на напряжение на конденсаторах фильтра.

Для этого приближенно оценим соотношение между током сети  $I_s$  и током нагрузки  $I_d$ :

$$3U_{\text{фм}} I_{\text{см}} \cos \varphi_s / 2 = U_d I_d, \quad (26)$$

где  $U_d$  – среднее значение напряжения на выходе АУВИТ, примерно равно (из 13)

$$U_d = U_{\text{лм}} k / \sqrt{2}, \quad (27)$$

где  $k$  – коэффициент регулирования  $k = I_{sabc} / I_{\text{см}}$ . Тогда, подставляя (27) в (26), после преобразовании получим:

$$I_{\text{см}} / I_d = \sqrt{2/3} k. \quad (28)$$

С учетом (1) и (2) получим:

$$I_{Cm} / I_d = \sqrt{2} k / 3. \quad (29)$$

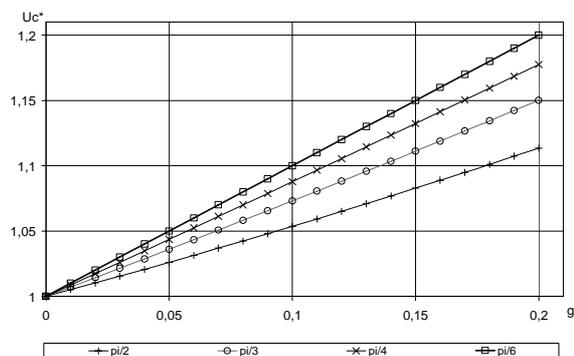


Рис. 7. Относительное напряжение на конденсаторах

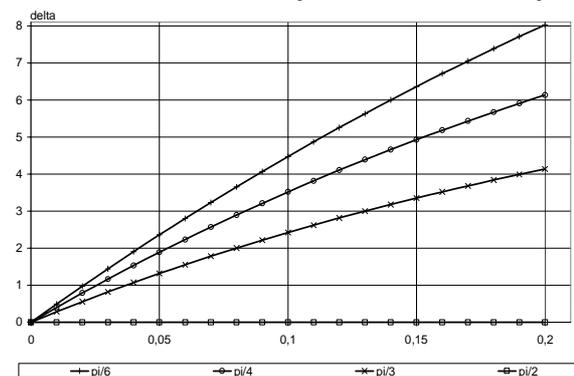


Рис. 8. Угол сдвига напряжения на конденсаторах относительно линейного напряжения сети

Ток конденсатора состоит из двух составляющих: 1) Низкочастотной (с частотой сети); 2) Высокочастотной (с частотой ШИМ). Как было указано выше, ток  $I_d$  замыкается через конденсаторы таким образом, что через конденсатор, подключенный к фазам, тиристоры в которых открыты, протекает ток  $2I_d/3$ , а через два других конденсатора протекает ток  $I_d/3$ .

Характер изменения напряжения на конденсаторе определяется суммой низкочастотного и высокочастотного токов. Рассмотрим для примера интервал, соответствующий сектору 1. Для определения направлений токов в конденсаторах рассмотрим шесть участков. В секторе 1 линейные напряжения  $u_{ab}$  и  $u_{ca}$  знакопостоянны. Линейное напряжение  $u_{bc}$  в интервале  $\pi/3 \div \pi/2$  отрицательно, а в интервале  $\pi/2 \div 2\pi/3$  положительно.

Возможны три комбинации открытых тиристоров: VS1, VS2; VS1, VS6; VS1, VS4. Соответственно составим таблицу для определения токов через конденсаторы фильтра на каждом из шести участков. Допустим, что напряжения сети представляют собой симметричную трехфазную систему. Тогда фазные токи сети равны:

$$\begin{cases} i_{sa}(t) = I_{\text{см}} \sin(\omega t + \varphi) \\ i_{sb}(t) = I_{\text{см}} \sin(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ i_{sc}(t) = I_{\text{см}} \sin(\omega t + \varphi - 4\pi/3) \end{cases} \quad (30)$$

Токи конденсаторов, равны:

$$\begin{cases} i_{Cab_s}(t) = I_{Cm} \sin(\omega t + \varphi + \pi/6) \\ i_{CbC_s}(t) = I_{Cm} \sin(\omega t + \varphi - \pi/2) \\ i_{CcA_s}(t) = I_{Cm} \sin(\omega t + \varphi - 7\pi/6) \end{cases} \quad (31)$$

В зависимости от величины угла  $\varphi$  первая гармоника тока через конденсатор будет сдвинута относительно фазного напряжения сети. В интервале от  $\pi/3$  до  $2\pi/3$  (первый сектор) при  $\varphi = \pi/2$  мгновенное значение тока первой гармоники конденсатора отрицательно, а при угле  $\varphi = \pi/6$  мгновенное значение тока первой гармоники тока конденсатора положительно.

Напряжения на конденсаторах, с учетом влияния индуктивностей сети определяются из следующих выражений:

$$\begin{cases} u_{Cab_s}(t) = U_{Cm} \sin(\omega t - \delta + \pi/6) \\ u_{Cbc_s}(t) = U_{Cm} \sin(\omega t - \delta - \pi/2) \\ u_{Cca_s}(t) = U_{Cm} \sin(\omega t - \delta - 7\pi/6) \end{cases} \quad (32)$$

При моделировании АУВИТ для подавления резонансных явлений оказалось необходимым включать последовательно с конденсаторами фильтра резисторы. Для рассмотренного примера оказалось достаточным сопротивление резисторов  $2 \Omega$ .

Выражения для напряжений на конденсаторах с учетом падения напряжения за счет тока нагрузки и с учетом падения на резисторах имеют вид:

$$\begin{cases} u_{Cab}(t) = U_{Cab_s}(t) + \frac{1}{C} \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} i_{Cab}(t) dt - i_{Cab}(t)R \\ u_{Cbc}(t) = U_{Cbc_s}(t) + \frac{1}{C} \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} i_{Cbc}(t) dt - i_{Cbc}(t)R \\ u_{Cca}(t) = U_{Cca_s}(t) + \frac{1}{C} \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} i_{Cca}(t) dt - i_{Cca}(t)R \end{cases} \quad (33)$$

Из табл. 3 видно, что токи в конденсаторах на интервалах 1 и 2 могут быть как положительными, так и отрицательными в зависимости от соотношения мгновенного значения линейного тока сети и тока нагрузки. Соответственно напряжение на конденсаторах будет увеличиваться или уменьшаться. Причем величина приращения напряжения определяется согласно следующему выражению:

$$\Delta U_C(t) = i_C(t)\Delta t / C, \quad (34)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени фиксированного состояния ключей. Для состояния 1 из табл. 3 это  $k_c T$ , для состояния 2 –  $(k_a - k_c)T$ , для 3 –  $(1 - k_a)T$  соответственно.

Таблица 3

Токи конденсаторов фильтра						
Интервал	$\pi/3 - \pi/2$			$\pi/2 - 2\pi/3$		
Состояние	1	2	3	1	2	3
Длительность	$k_c T$	$(k_a - k_c)T$	$(1 - k_a)T$	$k_c T$	$(k_a - k_c)T$	$(1 - k_a)T$
$i_{Cab}(t)$	$i_{Cab_s}(t) - I_d/3$	$i_{Cab_s}(t) - 2I_d/3$	$i_{Cab_s}(t)$	$i_{Cab_s}(t) - I_d/3$	$i_{Cab_s}(t) - 2I_d/3$	$i_{Cab_s}(t)$
$i_{Cbc}(t)$	$i_{Cbc_s}(t) - I_d/3$	$i_{Cbc_s}(t) + I_d/3$	$i_{Cbc_s}(t)$	$i_{Cbc_s}(t) + I_d/3$	$i_{Cbc_s}(t) - I_d/3$	$i_{Cbc_s}(t)$
$i_{Cca}(t)$	$i_{Cca_s}(t) - 2I_d/3$	$i_{Cca_s}(t) - I_d/3$	$i_{Cca_s}(t)$	$i_{Cca_s}(t) - 2I_d/3$	$i_{Cca_s}(t) - I_d/3$	$i_{Cca_s}(t)$

Среднее значение изменения напряжения на конденсаторе при допущении постоянства тока  $I_C$  на интервале фиксированного состояния ключей составляет:

$$\Delta U_{Cav}(t) = i_C(t)\Delta t / 2C. \quad (35)$$

Тогда (35) приводится к виду:

$$\begin{cases} u_{Cab}(t) = U_{Cab_s}(t) + i_{Cab}(t)\Delta t^2 / 2C - i_{Cab}(t)R \\ u_{Cbc}(t) = U_{Cbc_s}(t) + i_{Cbc}(t)\Delta t^2 / 2C - i_{Cbc}(t)R \\ u_{Cca}(t) = U_{Cca_s}(t) + i_{Cca}(t)\Delta t^2 / 2C - i_{Cca}(t)R \end{cases} \quad (36)$$

Уточним выражение (12), подставив в него вместо  $U_{ab}(t)$  и  $U_{ac}(t)$   $U_{Cab}(t)$  и  $-U_{Cbc}(t)$  из (36).

$$u_d = \frac{1}{T} \left( - \int_{k_c T+t}^{k_a T+t} u_{Cca}(t) dt + \int_{k_c T+t}^{k_a T+t} u_{Cab}(t) dt \right). \quad (37)$$

### РЕКУПЕРАТИВНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ АУВИТ

Рассмотрим переход системы пуска с АУВИТ в режим рекуперативного торможения машины.

В этом случае на входе АИТ действует отрицательное напряжение, представляющее собой выпрямленные противоЭДС обмоток статора. Ток через реакторы  $L_d$  должен протекать в том же направлении, что и в режиме передачи энергии из сети в машину. Следовательно, на выходе АУВИТ также должно быть

отрицательное напряжение, среднее значение которого в установившемся режиме равно среднему значению напряжения на входе АИТ.

Для перевода АУВИТ в режим рекуперации необходимо изменить логику подачи управляющих импульсов. Допустим, что максимально анодное напряжение тиристора VS1 (сектор 1 на рис. 6)

Тогда в режиме передачи энергии из сети в нагрузку этот тиристор должен быть открыт постоянно, а тиристоры VS2, VS4, VS6 переключаются в периоде ШИМ формируя синусоидальный токов в фазах сети. В режиме рекуперации должен быть постоянно открыт тиристор VS4, а тиристоры VS1, VS3, VS5 переключаются. То есть импульсы управления тиристорам анодной и катодной вентильных групп меняются местами. Необходимо также изменить знак сигнала обратной связи по току в системе авторегулирования тока (сигнал на входе регулятора тока РТ по рис. 1). В режиме потребления энергии из сети, если величина тока в звене постоянного тока  $I_d$  увеличивается, то уменьшается сигнал рассогласования, уменьшается амплитуда токов задания, уменьшается выходное напряжение АУВИТ, и, следовательно, уменьшается ток  $I_d$ . А в режиме возврата энергии в сеть увеличение тока  $I_d$  будет приводить к уменьшению выходного напряжения АУВИТ по модулю, однако, поскольку

это напряжение отрицательно, величина тока  $I_d$  будет возрастать. Поэтому для обеспечения обратной связи по току в режиме рекуперации необходимо изменить полярность сигнала рассогласования.

Таким образом, для обеспечения рекуперации в системе пуска на основе АУВИТ-АИТ необходимо специально формировать для СУ АУВИТ сигнал, позволяющий переход в режим возврата энергии в сеть. Очевидно, что возврат происходит в том случае, когда электромагнитный момент на валу меньше механического момента. Согласно уравнениям АМ признаком режима рекуперации является отрицательное значение производной скорости вращения вала машины.

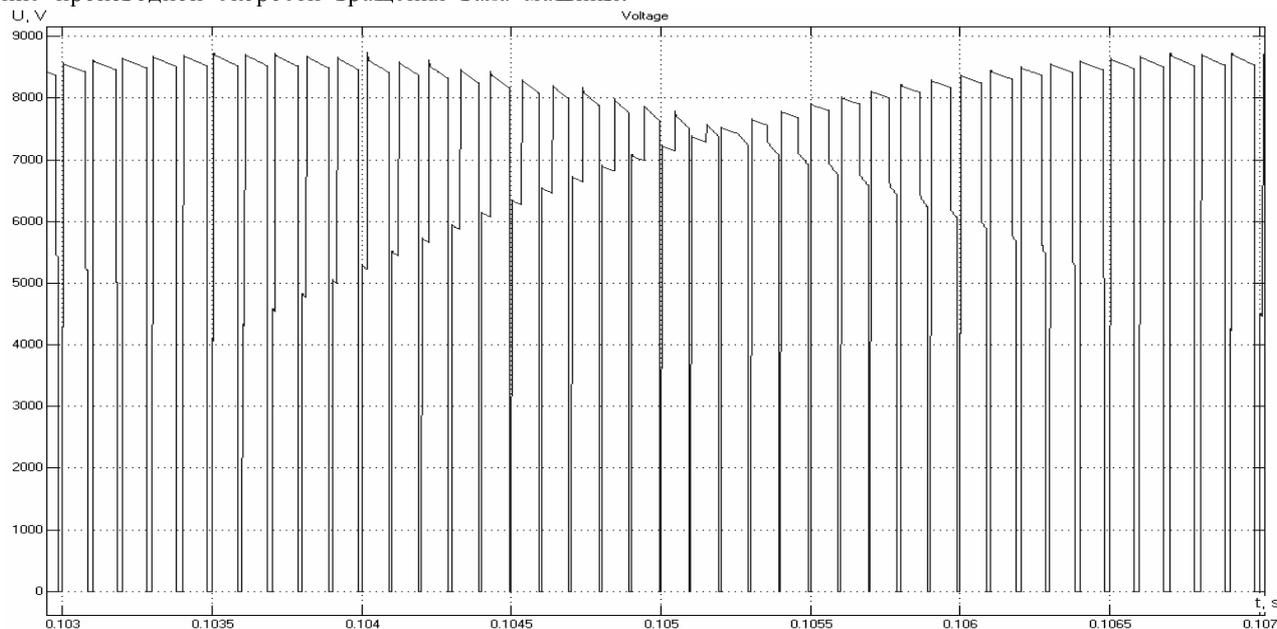


Рис. 9. Форма выходного напряжения АУВИТ

Как видно из рис. 9 выходное напряжение АУВ формируется из двух напряжений на конденсаторах входного фильтра. Видно, что напряжения на конденсаторах отстают от линейных напряжений сети на некоторый угол. Ток коммутатора, замыкаясь через конденсаторы, приводит к провалам напряжения на всем низкочастотном периоде повторяемости

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен алгоритм векторного управления АУВИТ с использованием коэффициентов заполнения фазного тока, определяемых с помощью линейной развертки.

2. Показано, что среднее значение выходного напряжения АУВИТ на периоде повторяемости при допущении идеальности входного фильтра зависит только от коэффициента заполнения фазного тока  $k$ .

3. Показано, что падение напряжения на индуктивности сети изменяет амплитуду и фазу линейного напряжения на конденсаторах согласно следующим выражениям:

$$U_{Cm*} = \sqrt{1 + g^2 + 2g \sin \varphi} \quad \delta = \arcsin \left( \frac{g \cos \varphi}{\sqrt{1 + g^2 + 2g \sin \varphi}} \right).$$

4. Характер изменения напряжения на конденсаторе фильтра определяется суммой низкочастотного и

Следовательно, эта величина должна рассчитываться в системе управления АМ.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ АУВИТ-АИТ

Для проверки полученных теоретических выводов составлена компьютерная модель АУВИТ. Моделировалась работа АУВИТ на активную нагрузку номинального сопротивления, сигнал задания по току также устанавливался номинальным.

Форма выходного напряжения в интервале времени, содержащем период повторяемости (0,1033-0,1067 с) приведена на рис. 9.

высокочастотного тока конденсатора. Величина низкочастотного тока зависит от емкости конденсаторов, а величина высокочастотного тока – от комбинации включенных в коммутаторе АУВИТ ключей.

5. Для перевода системы пуска на основе АУВИТ и АИТ в режим рекуперации энергии необходимо изменить логику подачи управляющих импульсов на ключи АУВИТ и изменить знак сигнала обратной связи по току в системе авторегулирования тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] J.R. Rodriguez, J.W. Dixon, J.R. Espinoza, J. Pontt, P. Lezana. "PWM Regenerative Rectifiers: state of the Art" IEEE Trans. On Ind. Electr., vol. 52, № 1, 2005, p.p. 5-22.
- [2] Перетворювальна техніка. Підручник. Ч. 2/ Ю.П. Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Морозов, М.В. Панасенко, В.Я. Ромашко, В.С. Руденко. За ред. В.С. Руденка. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
- [3] Е.И.Сокол, Ю.П. Гончаров. Частотнорегулируемый электропривод на базе инвертора тока с переключением двигателя с преобразователя на сеть. "Технічна електродинаміка". Темат. Вып. "Силовая електроніка та енергоефективність" ч. 5, 2007, С. 3-8.
- [4] Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.

Поступила 05.04.2008

## ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПРИСТРОЇ: ТЕРМІНОЛОГІЯ МІЖНАРОДНОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО СЛОВНИКА

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, E-mail: kbv@kpi.kharkov.ua

*Розглядається низка проблем, пов'язаних із запровадженням термінів і визначень з Міжнародного електротехнічного словника (МЕС). Починається публікація неофіційного перекладу однієї з частин МЕС, а саме частини 151 - *Electrical and magnetic devices (Електричні та магнітні пристрої)* з авторськими коментарями та тлумаченнями*

*Рассматривается ряд проблем, связанных с внедрением терминов и определений из Международного электротехнического словаря (МЭС). Начинается публикация неофициального перевода одной из частей МЭС, а именно части 151 - *Electrical and magnetic devices (Электрические и магнитные устройства)* с авторскими комментариями и разъяснениями*

У квітні цього року вийшов у світ навчальний посібник з грифом МОН України, присвячений міжнародній електротехнічній термінології стосовно основних видів електричних апаратів комутації, керування та захисту (Клименко Б.В. Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі. Навчальний посібник. – Харків: Талант, 2008. – 208 с.). Це видання накладом у 1500 примірників отримало позитивні відгуки не тільки навчально-педагогічних працівників багатьох вищих навчальних закладів, а й представників промислових підприємств, проектних організацій, науково-дослідних інститутів та комерційних установ, які стикаються у своїй практичній діяльності з сучасним електротехнічним обладнанням, зокрема з електричною апаратурою.

Враховуючи, що електричні апарати є однією з провідних навчальних дисциплін, яка посідає чільне місце у підготовці фахівців для електротехнічної галузі України, автор вирішив продовжити роботу над перекладами та тлумаченнями міжнародної електротехнічної термінології стосовно електричної апаратури та суміжних пристроїв. Характерною особливістю електричних апаратів як навчальної дисципліни є надзвичайно широка номенклатура пристроїв, що відносяться до цієї галузі електротехніки, а також величезна кількість понять, визначень, характеристик. Широке застосування сучасних електричних апаратів і аксесуарів у промисловості, будівництві, сільському господарстві й побуті, поступове входження України до загальносвітового економічного простору зумовлюють виняткову важливість розвитку міжкультурних комунікацій, а відтак, коректного застосування міжнародно визнаної термінології, зокрема, електротехнічних термінів та їх визначень.

Важливою передумовою конкурентоспроможності вітчизняної продукції є її відповідність вимогам міжнародних стандартів, передусім стандартів Міжнародної електротехнічної комісії або скорочено – МЕК (International Electrotechnical Commission – IEC) щодо конкретних груп та видів електричних апаратів. Отже, вітчизняні виробники електротехнічної продукції, які прагнуть підвищувати якість своїх виробів до міжнародного рівня, не можуть не користуватися стандартами МЕК, у яких значна (можна навіть сказати

підкреслена) увага приділяється коректному застосуванню понять та відповідних термінів.

Термінологія – основа будь-якої діяльності у цивілізованому суспільстві. З термінологічних розділів розпочинається будь-який міждержавний та політичний договір, будь-яка господарська угода, чітке визначення понять наводиться у будь-якому законі.

Важливість адекватного застосування термінології в електротехніці важко переоцінити, оскільки нечіткі визначення й некоректне тлумачення понять неодноразово призводило до серйозних непорозумінь, а подекуди й до аварійних ситуацій. Тому Міжнародна електротехнічна комісія, століття якої відзначалося нещодавно – у 2006 році, постійно опікується питаннями термінології.

Ще у далекому 1910 році МЕК створила спеціальний Комітет для складання міжнародного переліку термінів та їх визначень – Технічний комітет №1 МЕК (ТК1). Згодом ця дуже складна й копітка робота призвела до створення Міжнародного електротехнічного словника – МЕС (*International Electrotechnical Vocabulary – IEV*), який витримав декілька видань. Сучасний Словник складається з 74 частин (parts), кожна з яких відповідає певній галузі електротехніки, а також суміжним галузям.

Частини Словника згруповані у класи (classes), номери та назви яких подані нижче:

- 1 Загальні поняття (General concepts)
- 2 Матеріали (Materials)
- 3 Вимірювання, автоматичне керування (Measurement, automatic control)
- 4 Електричне обладнання (Electric equipment)
- 5 Електронне обладнання (Electronic equipment)
- 6 Генерування, передача і розподілення енергії (Generation, transmission and distribution of energy)
- 7 Телекомунікації (Telecommunications)
- 8 Специфічні застосування (Particular applications)

Чому ми концентруємо увагу саме на Міжнародному електротехнічному словникові? Адже у світі створено чимало досить популярних словників, над укладанням яких працювали авторитетні фахівці, у тому числі відомі у наукових колах професори провідних університетів з усіх континентів. Відповідь на це запитання є дуже переконливою – *Міжнародний електротехніч-*

ний словник, маючи статус стандарту – IEC 60050, є термінологічним підґрунтям усіх чинних стандартів МЕК, нормативні посилання у яких, зазвичай, починаються з посилань на різні частини стандарту IEC 60050. Крім того, суттєва частка термінів, які наводяться, тлумачаться та застосовуються у стандартах МЕК, перенесені безпосередньо зі Словника з відповідними посиланнями.

Кожне поняття Словника має свій номер, який складається з розділених дефісами номера частини (три цифри, перша з яких відповідає номеру класу), номера розділу (section) у межах відповідної частини (дві цифри) та номера поняття (concept) у межах відповідного розділу (дві або три цифри), наприклад 441-17-07.

Терміни та відповідні визначення у сучасному Словнику згідно з Директивами ISO/IEC мають наводитися французькою, англійською та російською мовами. Ці три мови вважаються основними мовами Словника (principal IEC languages). Ще вісім мов, а саме арабська, німецька, іспанська, італійська, японська, польська, португальська та шведська, вважаються додатковими мовами Словника (additional IEC languages). Цими мовами у Словнику мають наводитися тільки терміни (без визначень).

Насправді ж мовна наповненість Словника не завжди відповідає вимогам Директив ISO/IEC. Паперова версія, яка існує у вигляді окремих частин, що оформлені як частини стандарту IEC 60050, наприклад IEC 60050-151, в усіх частинах містить терміни та відповідні визначення англійською та французькою мовами (49 частин містять також відповідні терміни та визначення російською мовою), а також терміни (без тлумачень) ще декількома мовами, перелік яких не завжди співпадає з переліком додаткових мов.

Електронна версія Словника розміщена на сайті Міжнародної електротехнічної комісії. До 2008 р. вільний доступ до тлумачень термінів (англійською та французькою мовами) надавався лише до перших восьми частин Словника: (101 – Mathematics; 111 – Physics and chemistry; 121 – Electromagnetism; 131 – Electric and magnetic circuits; 151 – Electrical and magnetic devices; 161 – Electromagnetic compatibility; 191 – Dependability and quality of service; 195 – Earthing and protection against electric shock).



Оболонка Електропедії (з сайту IEC)

З 2008 року розміщена на сайті IEC електронна версія Міжнародного електротехнічного словника, яка отримала назву "Електропедія" ("Electropedia"), надає

вільний доступ до усіх частин Словника, але терміни та визначення наводяться лише французькою та англійською мовами, а німецькою та іспанською – лише терміни. У даній статті розпочинається переклад та тлумачення частини IEC, яка входить до першого класу понять, що має ключове значення для термінології Міжнародного електротехнічного словника, а саме частини 151 (Електричні та магнітні пристрої). Ця частина, як і деякі інші частини, які тісно пов'язані з термінологією щодо електричної апаратури, зокрема частини 442 (Електричні аксесуари), 826 (Електричні установки) та 195 (Заземлення та захист від ураження електричним струмом), раніше не перекладалися на російську мову, хоча, як вже зазначалося, російська мова є однією з трьох основних мов Словника. Мабуть це не випадково, адже у цих частинах міститься низка термінів, які важко перекласти на російську мову, не порушивши традиції офіційної російськомовної термінології.

Найважче, як це не дивно, перекласти на російську мову термін "nominal value" (151-16-09), адже специфікатор "номинальный" у російськомовній офіційній термінології зазвичай ставиться у відповідність до терміну "rated value" (див., наприклад ГОСТ Р 50030.1, 2.5.3). То як же перекласти "nominal value"? У тому самому стандарті цей термін перекладається як "паспортное значение" (ГОСТ Р 50030.1, 2.5.1). В результаті з'явилося таке дивне поняття як "паспортное напряжение системы питания" (ГОСТ Р 50030.1, 7.2.3), яке у тому стандарті не розтлумачується, адже в оригіналі – це "nominal voltage of the supply system" – номінальна напруга системи живлення. У згаданому вище посібнику детально проаналізовано можливість перекладу термінів "nominal" та "rated" з урахуванням термінології основних та додаткових мов IEC та рекомендовано такі україномовні переклади: "nominal" – "номінальний", "rated" – "номінативний".

Певні складнощі викликає переклад терміну "behaviour" в контексті комутаційної апаратури, запобіжників тощо. У побутовому смислі "behaviour" – це поведінка, вчинки, манери. Слово "behaviour" зустрічається в частині 441 Словника, яка перекладалася на російську мову й досі існує у вигляді офіційного російського перекладу у паперовій версії Словника. У цій частині слово "behaviour" перекладається як "поведение", наприклад **441-17-18 peak withstand current** – the value of peak current that a circuit or a switching device in the closed position can withstand under prescribed conditions of use and behaviour" перекладено наступним чином: "пик выдерживаемого тока; ток электродинамической стойкости – значение пика тока, который цепь или коммутационный аппарат может выдерживать во включенном положении при предписанных условиях применения и поведения". Виникає цілком слушне питання, які такі **умови поведінки** можна приписати електричним апаратам? Насправді ж стосовно апаратури термін "behaviour" слід розглядати як "особливості функціонування" чи "режими роботи", наприклад, різниця у функціонуванні апаратів, розташованих окремо, або таких, що стоять впритул один до одного, функціонування апаратів у безперервному ("uninterrupted duty") або короткочасному ("temporary duty") режимах, функціонування апаратів, приєднаних до джерела живлення з боку верхніх або

нижніх виводів тощо. Особливості функціонування апаратів проявляються у зміні їх кількісних характеристик – зміні значення робочого струму, зміні здатності до відмикання, зміні часу спрацьовування тощо.

До речі, термін "terminal" часто перекладають як "вивід" (у згаданому вище посібнику також), але у частині 442 IEV розрізняються поняття "terminal" та "termination", а відповідні визначення дозволяють зробити висновок, що termination – це вивід, а terminal – поєднання виводу та затискного пристрою.

Викликають певні складнощі переклади низки термінів, пов'язаних з елементами електричних кіл, адже в епоху боротьби з космополітизмом іншомовні терміни замінялися російськомовними. Не всі терміни постраждали – лишилися "резистор", "реактор", "конденсатор", "індуктивність" тощо. А от такі терміни як "імпеданс", "реактанс" та деякі інші були ліквідовані, хоча у старому радянському термінологічному стандарті (ГОСТ 19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения – Electrotechnics. Basic concepts. Terms and definitions) ці терміни ще згадуються, але як синоніми, що не рекомендуються для застосування. У новітньому ж російському термінологічному стандарті (ГОСТ Р 52002-2003. Электротехника. Термины и определения основных понятий – Electrotechnics. Terms and definitions of basic concepts) про ці терміни навіть згадки нема. Показово, що старий радянський та новітній російський термінологічний стандарти, незважаючи на переклад їх назв на англійську мову, не містять іншомовних еквівалентів термінів, наведених у цих стандартах.

Відсутність іншомовних еквівалентів термінів може призвести до некоректного їх зворотного перекладу. Наприклад, термін "емкостное сопротивление" (ГОСТ 19880, п. 143; ГОСТ Р 52002, п. 149), якщо не знати англomовного еквіваленту ("capacitive reactance"), цілком природно перекласти як "capacitive resistance" (адже "сопротивление" у будь-якому словнику перекладається як "resistance"). Такий переклад для англomовного фахівця буде виглядати абсурдно, адже "resistance" не може бути від'ємним, а "capacitive reactance" – це величина, яка є від'ємною за визначенням.

Наведена вище вигадана ситуація не така вже й надумана. Наприклад, один з чинних в Україні (і у Росії теж) стандартів (ДСТУ 3025-95 (ГОСТ 9098-93. Выключатели автоматические низковольтные – Low-voltage automatic switches) у назві містить її переклад, зроблений упорядниками того стандарту на англійську мову. Такий переклад викликає певне непорозуміння, адже у стандарті мова йде про апарати, що здатні відмикати струми коротких замикань (за англomовною термінологією – "circuit-breakers"), а "switch" – за тією ж термінологією це апарат, призначений для відмикання струмів у колах при нормальних умовах і не здатний до відмикання коротких замикань.

Чинний, хоч не такий вже новий, український термінологічний стандарт (ДСТУ 2843-94. Электротехника. Основные понятия. Термины та визначення), хоча й дещо нерішуче, але поновлює низку "репресованих" у радянські часи термінів. Ми кажемо про нерішучість, бо поновлені терміни надаються не у вигляді основної форми, а як синоніми. Щоправда, ці синоніми, на відміну ГОСТ

19880, вже позбавлені статусу не рекомендованих, зазначено лише, що синоніми подаються курсивом. З іншого боку, в іншому реченні вступу до стандарту зазначається, що "для кожного поняття встановлено тільки один стандартизований термін". То як же бути з синонімами? Здається, що зазначені синоніми, враховуючи їх міжнародний статус, з часом повинні набувати більшої ваги, а терміни, що не відповідають міжнародно визнаній термінології, мають поступово відходити.

Є ще одна важлива відмінність ДСТУ 2843 від старого радянського та новітнього російського термінологічного стандартів – терміни в українському стандарті подаються не тільки українською, а ще й німецькою, англійською, французькою та російською мовами, а визначення – крім української, ще й російською мовою. Наявність іншомовних термінів у національному стандарті слід вітати, адже у такий спосіб стандарт сприяє полегшенню міжкультурних комунікацій, але при цьому неприпустимо уникати зазначення джерел, з яких іншомовні терміни та визначення запозичені, і які мають надаватися без будь-яких корективів. Термінологічними джерелами щодо німецької, англійської та французької мов, здається, має бути Міжнародний електротехнічний словник, який створюється Міжнародною електротехнічною комісією – авторитетним міжнародним органом із стандартизації у галузі електротехніки та суміжних галузей (усіма іншими галузями, крім електротехніки та суміжних галузей, опікується ISO – Міжнародна організація зі стандартизації). Щодо російської мови, то джерелами російськомовних термінів мають бути відповідні російські стандарти.

Повертаючись до термінів, що стосуються електричних кіл, зазначимо, що IEV розрізняють поняття "resistance (1)" (німецькою мовою "Widerstand" – опір), що застосовується для резистивних елементів, та "resistance (2)" (німецькою мовою "Wirkwiderstand" – діючий опір), що застосовується для синусоїдальних процесів у лінійних колах. Обидва поняття позначаються однаковою символікою  $R$ , але визначаються вони по-різному:

"resistance (1)":  $R = u_{AB} / i$ , де  $u_{AB}$  – миттєве значення напруги між терміналами А та В резистивного елемента,  $i$  – миттєве значення струму через цей елемент (див. IEV 131-12-04);

"resistance (2)":  $R = \operatorname{Re}(\underline{Z})$ , де  $\underline{Z} = \underline{U}_{AB} / \underline{I}$  – імпеданс кола,  $\underline{U}_{AB}$  – вектор на комплексній площині, що представляє напругу на даному елементі кола,  $\underline{I}$  – вектор на комплексній площині, що представляє струм у даному елементі кола (див. 131-12-45).

Ці поняття приблизно відповідають поняттям "електричний опір" (ДСТУ 2843, п.92) та "активний електричний опір" (ДСТУ 2843, п.122), але існують певні розбіжності у смислі цих понять за IEV та ДСТУ, а визначення відрізняються дуже суттєво. Суттєві розбіжності існують у визначеннях IEV та ДСТУ щодо інших величин, що характеризують процеси в електричних колах, тому, користуючись "синонімічними вольностями", які надає нам ДСТУ 2843, у даній публікації будемо застосовувати такі позначення та переклади термінів для елементів та величин, що характеризують процеси в електричних колах.

### Елементи:

resistor	резистор;
inductor	індуктор, реактор;
capacitor	конденсатор.

### Величини:

$R$	resistance (1)	опір;
$L$	inductance	індуктивність;
$C$	capacitance	ємність;
$Z$	impedance	імпеданс;
$Z$	apparent impedance	уявний імпеданс
		модуль імпедансу (для синусоїдальних процесів);
$R$	resistance (2)	резистанс;
$X$	reactance	реактанс;
$X_L$	inductive reactance	індуктивний реактанс;
$X_C$	capacitive reactance	ємнісний реактанс.

Перевагою зазначених перекладів, крім того, що вони побудовані на міжнародних позначеннях, є їх короткість, отже, користуючись ними, зручніше конструювати словосполучення. Наприклад, термін "імпеданс" значно коротший, ніж "комплекс повного опору", а також зручніший у конструюванні словосполучень, особливо, якщо врахувати, що в англійській технічній літературі цей термін застосовується також у словосполученні "apparent impedance" ("уявний імпеданс" або для синусоїдальних процесів – "модуль імпедансу"). Наприклад, переклад словосполучення "low-impedance conductor" як "низькоімпедансний провідник" виглядає привабливіше, ніж "провідник з малим модулем повного опору".

Словосполучення "активний опір", "реактивний опір" у даній публікації не будуть застосовуватися, тому що у міжнародній практиці поняття "активний" ("active") застосовується для кіл, що мають джерела живлення, з антонімом "пасивний" ("passive"), що застосовується для кіл без джерел живлення. Отже, замість словосполучення "повний опір є практично активним" будемо застосовувати вираз "імпеданс є практично резистивним". Поняття "реактивний" ("reactive") в IEC застосовується лише у контексті реактивної потужності, а поняття "активний" ("active") – для позначення кіл із джерелами живлення. Термін "actif" (французькою мовою) застосовується для позначення заживлених струмопровідних частин ("live" англійською мовою).

До речі, термін "заживлювати" (російською мовою – запитывать) дуже підходить до англійського "energize". Термін, що позначає зворотню дію "de-energize", будемо перекладати як "знеживлювати".

Ще одним нюансом відмінностей термінології IEC від прийнятої у нас термінології є позначення такої інтегральної характеристики змінних величин, яку у нас прийнято називати *діючим* або *ефективним* значенням, наприклад діюче значення струму. Це позначення обґрунтовують тим, що змінний струм з певним діючим значенням діє так само (нагріває провідник, через який він тече), як і постійний струм відповідного значення. Це обґрунтування можна вважати коректним лише коли опір провідника в обох випадках однаковий. Насправді ж, змінний струм викликає ефекти витіснення струму, зокрема поверхневий ефект (skin-effect), які

збільшують втрати енергії у провіднику, отже, як бачимо, постійний струм діє інакше, ніж змінний струм з таким самим "діючим" значенням. В термінології IEC та й взагалі в англійській термінології специфікатори "діючий" або "ефективний" стосовно значень тих чи інших величин не вживається, натомість застосовується специфікатор "середньоквадратичний" – "root-mean-square" із скороченням "r.m.s.", наприклад, r.m.s. voltage – середньоквадратична напруга, а не діюча або ефективна напруга.

Переклад термінів та визначень Міжнародного електротехнічного словника наводиться у даній публікації з урахуванням наведених вище аргументів. При цьому застосовано принцип синхронного перекладу – зліва від перекладу розташовано англійський оригінал, який дає читачеві можливість скласти уявлення щодо коректності опублікованого неофіційного перекладу.

У даній публікації, на відміну від згаданого вище посібника, більше уваги приділено дотриманню директив ISO/IEC щодо форми представлення термінів та визначень:

- терміни та визначення записуються малими літерами, початкові літери теж малі;
- терміни записуються напівжирним шрифтом;
- синоніми записуються в окремих рядках;
- частини термінів, що можуть бути опущені, записуються у дужках напівжирними літерами;
- символ, що застосовується для позначення поняття, записується в окремому рядку перед терміном;
- визначення складаються з одного речення;
- крапки після терміну та наприкінці визначення не ставляться;
- примітки до англійських визначень оформлюються у повній відповідності до оригіналу;
- примітки можуть складатися з декількох речень;
- текст примітки починається з великої літери і закінчується крапкою;
- якщо приміток декілька, вони нумеруються, після закінчення кожної примітки ставиться крапка.

При перекладі термінів та визначень автор користувався різними комп'ютерними словниками і при цьому неодноразово стикався з проблемою того чи іншого варіанту перекладу. Наприклад, проблема перекладу терміну "magnet" ("магнет" чи "магніт"?) була розв'язана на користь форми "магніт" з урахуванням наступних чинників.

1. У чинному термінологічному стандарті з електротехніки (ДСТУ 2843-94) застосовується форма "магніт".
2. Хоча найбільш популярні англійські словники дають різні транскрипції слова "magnet" (LingvoUniversal – [ˈmæɡnət], а Collins – [ˈmæɡnɪt]), але для слова "electromagnet" обидва словники застосовують одну й ту ж транскрипцію – [ɪˌlektɹəʊˈmæɡnɪt].

Наведений приклад є одним з багатьох, тому на закінчення підкреслимо, що метою даної публікації є ознайомлення читачів із сучасною міжнародною електротехнічною термінологією, а не намагання негайного її запровадження в українській формі.

**INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL VOCABULARY  
Chapter 151**

**ELECTRICAL AND MAGNETIC DEVICES**

**1.1. General**

**151-11-01 electricity** (1)

set of phenomena associated with electric charges and electric currents

NOTE 1 – Examples of usage of this concept: static electricity, biological effects of electricity.

NOTE 2 – In English, the term "electricity" is also used to denote electric energy. For example, the expression "distribution of electricity" is used in English.

**151-11-02 electricity** (2)

branch of science dealing with electric phenomena

NOTE – Examples of usage of this concept: handbook of electricity, school of electricity.

**151-11-03 electric**, adj

containing, producing, arising from, or actuated by electricity

NOTE – Examples of usage of the term "electric": electric energy, electric lamp, electric motor, electric quantity.

**151-11-04 electrical** (1), adj

qualifies a person involved in electricity

NOTE – Example of usage of this concept: electrical engineer.

**151-11-05 electrical** (2), adj

pertaining to electricity, but not having its properties or characteristics

NOTE – Examples of usage of this concept: electrical handbook.

*Можна навести безліч прикладів, коли термін "electrical" також застосовується (у тому числі і в різних частинах ІЕV) до явищ чи об'єктів, що мають відношення до електрики і мають її властивості та характеристики: "electrical energy" (див. 441-13-04), "electrical apparatus" – switches, socket outlets, circuit-breakers, telephone outlets etc. (див. 442-02-41), "electrical equipment" (див. 442-01-21), "electrical appliance" (див. 442-07-04), "electrical accessories" (див. 826-06-04) тощо.*

**151-11-06 magnetism**

set of phenomena associated with magnetic fields

**151-11-07 magnetic**, adj

pertaining to magnetism

**151-11-08 electromagnetism**

set of the phenomena associated with electromagnetic fields

*Електромагнітні поля пов'язують, зазвичай, з високими та надвисокими частотами коливань електричних та магнітних величин.*

**151-11-09 electromagnetic**, adj

pertaining to electromagnetism

**151-11-10 electromechanical**, adj

pertaining to the interaction between electric and mechanical phenomena

*До електро механічних відносять пристрої, робота або спрацьовування яких пов'язані з рухом або обмеженим переміщенням будь-яких частин цих пристроїв, наприклад, електричні машини, комутаційні апарати тощо.*

**151-11-11 electrical engineering  
electrotechnology**

technology of the practical applications of the electric, magnetic and electromagnetic phenomena

**151-11-12 electrotechnical**, adj

pertaining to electrotechnology

**МІЖНАРОДНИЙ  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ СЛОВНИК  
Частина 151**

**ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПРИСТРОЇ**

**Загальні поняття**

**електрика** (1)

сукупність явищ, пов'язаних з електричними зарядами та електричними струмами

*Примітки.* 1. Приклади застосування цього поняття: статична електрика, біологічні наслідки електрики.

2. В англійській мові термін "electricity" застосовується також для позначення електричної енергії. Наприклад, "розподілення електричної енергії" в англійській мові – це "distribution of electricity".

**електрика** (2)

наукова галузь (дисципліна), що відноситься до електричних явищ

*Примітка.* Приклади застосування цього поняття: довідник з електрики, електротехнічний навчальний заклад (факультет в університеті).

**електричний** (1)

той, що містить, створює, виникає в результаті або приводиться у дію електрикою

*Примітка.* Приклади застосування терміна "електричний": електрична енергія, електрична лампа, електричний двигун, електрична величина.

**електрик**

кваліфікує особу, яка має справи з електрикою

*Примітка.* Приклад застосування цього поняття – інженер-електрик.

**електричний** (2)

те, що має відношення до електрики, але не має її властивостей або характеристик

*Примітка.* Приклад застосування цього поняття – електричний довідник або довідник з електрики.

**магнетизм**

сукупність явищ, пов'язаних з магнітними полями

**магнітний**

той, що має відношення до магнетизму

**електромагнетизм**

сукупність явищ, пов'язаних з електромагнітними полями

**електромагнітний**

той, що має відношення до електромагнетизму

**електромеханічний**

той, що має відношення до взаємодії між електричними та механічними явищами

**електротехніка**

**електротехнології**

технології практичних застосувань електричних, магнітних та електромагнітних явищ

**електротехнічний**

той, що має відношення до електротехніки

**151-11-13 electronics, noun**

branch of science and technology dealing with the motion of charge carriers in vacuum, gas or semiconductor, the resulting electric conduction phenomena, and their applications

NOTE – Phenomena and applications such as electric arc welding, ignition sparks in motors, corona effect are generally excluded from electronics.

**151-11-14 electronic, adj**

pertaining to electronics

**151-11-15 power electronics**

field of electronics which deals with the conversion or switching of electric power with or without control of that power

**151-11-16 electrochemistry**

branch of science and technology dealing with the relations between chemical reactions and electric phenomena

**151-11-17 electrobiology**

branch of science and technology dealing with the relations between biological systems and electric phenomena

**151-11-18 electroheat**

branch of science and technology dealing with the intentional transformation of electric energy into thermal energy

**151-11-19 electrothermal, adj**

pertaining to electroheat

**151-11-20 device**

material element or assembly of such elements intended to perform a required function

NOTE – A device may form part of a larger device.

*Поняття "пристрій" ("device") має багато спільних ознак з поняттям "апарат" ("apparatus" – див. 151-11-22). І хоча у деяких нюансах вони розрізняються (апарат за визначенням є окремою самодостатньою одиницею, а пристрій може бути частиною більшого пристрою), але часто-густо ці поняття змішуються: наприклад, "switch" за визначенням – це пристрій (див. 441-14-10), а у 442-01-21 поняття "switch" відносять до апаратів.*

**151-11-21 component**

constituent part of a device which cannot be physically divided into smaller parts without losing its particular function

*Приклади: транзистор, резистор, конденсатор тощо – це компоненти, які є складовими електронного пристрою.*

**151-11-22 apparatus**

device or assembly of devices which can be used as an independent unit for specific functions

NOTE – In English, the term "apparatus" sometimes implies use by skilled persons for professional purposes.

*Як бачимо, поняття "apparatus" в англійській термінології можна застосовувати до будь-якого пристрою, якщо його можна розглядати як окрему (незалежну) одиницю, що виконує певні функції. Отже, "electric apparatus" або "electrical apparatus" – це будь-який пристрій, що, виконуючи певні функції, виробляє, перетворює, передає або застосовує електричну енергію.*

*У вітчизняній технічній літературі поняття "електричний апарат" охоплює широке коло пристроїв, які здійснюють різноманітні функції комутації, керування, контролю, регулювання, обмеження надструмів і перенапруг, та захисту людей, майна і довкілля в процесі виробництва, транспортування, перетворення, розподілення та споживання електричної енергії. Виходячи з визначення 441-11-01, будемо розрізняти поняття "електричні апарати" (множина від "електричний апарат") та "електрична апаратура" (сукупність електричних апаратів та комплектних пристроїв, відповідний англійський термін – "switchgear and controlgear").*

**151-11-23 appliance**

apparatus intended for household or similar use

*Термін "appliance" застосовується до пристроїв побутового призначення – електропобутових приладів, таких як холодильник, пральна машина, кухонний комбайн, побутовий світильник тощо.*

**електроніка**

наукова та технологічна галузь (дисципліна), яка розглядає рух носіїв заряду у вакуумі, газі або у напівпровіднику, з відповідними явищами електричної провідності та їх застосуваннями

**електронний**

той, що відноситься до електроніки

**силова електроніка**

розділ електроніки, який розглядає процеси перетворення або комутації електричної енергії з керуванням або без керування цими процесами

**електрохімія**

наукова та технологічна галузь (дисципліна), яка розглядає зв'язки між хімічними реакціями та електричними явищами

**електробиологія**

наукова та технологічна галузь (дисципліна), яка розглядає зв'язки між біологічними системами та електричними явищами

**електронагрівання**

наукова та технічна галузь (дисципліна), яка розглядає способи навмисного перетворення електричної енергії у теплову

**електротепловий**

той, що має відношення до електронагрівання

**пристрій**

матеріальний елемент або комплект таких елементів, призначений для виконання певної функції

*Примітка.* Пристрій може бути частиною більшого пристрою.

**компонент****деталь**

складова частина пристрою, яка не може бути фізично розділена на більш дрібні частини без втрати її специфічної функції

**апарат**

пристрій або комплект пристроїв, який може застосовуватися як незалежна одиниця для виконання визначених функцій

*Примітка.* В англійській мові термін "apparatus" іноді передбачає використання кваліфікованими особами для професійних цілей.

**побутовий апарат**

апарат, призначений для побутового та аналогічного застосування

### 151-11-24 accessory

device supplementing a main device or apparatus, but not forming part of it, that is needed for its operation or to confer on it specific characteristics

Поняття "аксесуар" ("accessory") застосовують зазвичай до допоміжних пристроїв. Приклад: реле – основний пристрій, а монтажна колодка та пружинна скобка, яка запобігає випадінню реле з колодки – аксесуари. Аксесуарами є також гнучкі кабелі з штировими та гніздовими з'єднувачами, які застосовуються для підведення електричної енергії до побутових апаратів та промислового обладнання тощо. До аксесуарів в англомовній електротехнічній літературі комутаційні та захисні апарати, наприклад вимикачі, розетки, автоматичні відмикачі, неавтоматичні комутаційні апарати (у тому числі комбіновані із запобіжниками побутового призначення), відмикачі, керовані різницевиими струмами, побутові обмежувачі перенапруг, різноманітні з'єднувачі тощо, які є обов'язковими приналежностями електропроводок (див. IEC 442).

### 151-11-25 equipment

single apparatus or set of devices or apparatuses, or the set of main devices of an installation, or all devices necessary to perform a specific task

NOTE – Examples of equipment are a power transformer, the equipment of a substation, measuring equipment.

Термін "обладнання" ("equipment") позначає поняття, яке є узагальнюючим для таких понять як апарат, пристрій, їх сукупність тощо і є складовою терміну, який позначає електроприймачі ("current-using equipment": 826-16-02).

### 151-11-25 installation

one apparatus or a set of devices and/or apparatuses associated in a given location to fulfil specified purposes, including all means for their satisfactory operation

Термін "установка" ("installation") також узагальнює низку понять, таких як апарат, пристрій, сукупність пристроїв тощо і є складовою поняття "електрична установка" ("electrical installation": 826-10-01)

### 151-11-27 system

set of interrelated elements considered in a defined context as a whole and separated from their environment

NOTE 1 – A system is generally defined with the view of achieving a given objective, e.g. by performing a definite function.

NOTE 2 – Elements of a system may be natural or man-made material objects, as well as modes of thinking and the results thereof (e.g. forms of organisation, mathematical methods, programming languages).

NOTE 3 – The system is considered to be separated from the environment and the other external systems by an imaginary surface, which cuts the links between them and the system.

NOTE 4 – The term "system" should be qualified when it is not clear from the context to what it refers, e.g. control system, colorimetric system, system of units, transmission system.

Наведене вище визначення навряд чи надає можливість чітко відрізнити поняття системи від інших понять, які відносяться до складних об'єктів, таких як апарат, пристрій, обладнання, установка тощо, але примітка 4 розв'язує цю колізію, надаючи можливість контекстного уточнення поняття "система" ("system").

### 151-11-28 operation

combination of activities necessary to permit an installation to function

NOTE – Operation includes matters as switching, controlling, monitoring and maintenance as well as any work activities.

Застосований у наведеному вище визначенні термін "установка" ("installation") слід розглядати як узагальнення для низки складних об'єктів, для яких має застосовуватися контекстне уточнення поняття "операція" ("operation"). Наприклад, поняття операції контактного комутаційного апарата в IEC 441 визначається як переміщення рухомого контакту (контактів) з одного положення у суміжне положення ("operation (of a mechanical switching device)": 441-16-01).

Переклад інших розділів частини 151 Міжнародного електротехнічного словника планується опублікувати у наступних номерах нашого журналу. Редакція журна-

### аксесуар

#### приналежність

пристрій, що доповнює основний пристрій або апарат, але такий, що не є його частиною, хоча необхідний для його роботи або для надання йому особливих (специфічних) характеристик

#### обладнання

одиначний апарат або сукупність пристроїв чи апаратів або сукупність основних апаратів установки або усі пристрої, що є необхідними для виконання специфічної задачі

Примітка. Прикладами обладнання є силовий трансформатор, обладнання підстанції, вимірювальне обладнання.

#### установка

один апарат або сукупність пристроїв та/або апаратів, з'єднаних у даному місці для виконання певних цілей, включаючи всі засоби для їх задовільної роботи

#### система

сукупність взаємопов'язаних елементів, що розглядаються у визначеному контексті як дещо ціле та відділене від свого оточення

Примітки. 1. Система зазвичай визначається з точки зору досягнення заданої мети, наприклад виконанням визначеної дії.

2. Елементами системи можуть бути природні або штучні матеріальні об'єкти, а також способи мислення та його результати (наприклад, форми організації, математичні методи, мови програмування).

3. Вважається, що система є відділеною від оточення та інших зовнішніх систем уявною поверхнею, яка перерізає зв'язки між ними та даною системою.

4. Термін "система" слід уточнювати, коли не зрозуміло з контексту, до чого він відноситься, наприклад, система керування, колориметрична система, система одиниць, система (електро)передачі.

#### операція

сукупність дій, необхідних для того, щоб дати можливість установці функціонувати

Примітка. Операція включає такі дії, як комутація, керування, спостереження та експлуатацію, а також будь-які види трудової діяльності.

лу "Електротехніка і Електромеханіка" запрошує читачів до обговорення опублікованих перекладів та коментарів.

Надійшла 20.02.2007

## МОДЕЛЮВАННЯ СИЛ ОДНОСТОРОННЬОГО МАГНІТНОГО ТЯЖІННЯ В КОАКСІАЛЬНО-ЛІНІЙНОМУ СИНХРОННОМУ ВІБРАТОРІ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ РОЗТАШУВАННІ ЯКОРЯ

Макогон С.А.

Київський національний університет будівництва і архітектури

Україна, 03037, Київ, пр. Повітрофлотський 31, КНУБА, кафедра Електротехніки та електроприводу  
тел. (044) 241-55-65, e-mail: mcogon@ukr.net

*Проаналізовано сили одностороннього магнітного тяжіння і тягові характеристики методом скінченних елементів для коаксіально-лінійного синхронного вібратора з зубцевим та беззубцевим статором.*

*Проанализированы силы одностороннего магнитного притяжения и тяговые характеристики методом конечных элементов для коаксиально-линейного синхронного вибратора с зубчатым и беззубчатым статором.*

### ВСТУП

Збуджувачі коливань (вібратори) широко використовуються в народному господарстві. Часто необхідно отримати коливання тільки однієї направленості. Традиційна дебалансна конструкція вібратора має ряд суттєвих недоліків, а саме: недовговічність дебалансних валів, підшипників (через значні динамічні навантаження); утворення зайвих бокових коливань (що знижує ККД вібратора) та необхідність в синхронізації обертання дебалансів.

Для зменшення цих недоліків пропонується використовувати електричний вібратор на базі коаксіально-лінійного синхронного двигуна (ВКЛСД) [1-4].

Під час виготовлення деталей двигуна та його складанні, а також у процесі експлуатації при зношенні підшипників чи стрижня якоря може виникнути несиметрія у його розташуванні відносно статора. При цьому виникають електромагнітні сили одностороннього магнітного тяжіння, що притискають якір до статора, збільшуючи тертя у підшипниках та викривлюючи стрижень якоря. Метою роботи є аналіз електромагнітних сил магнітного тяжіння для ВКЛСД двох типів - з зубцевим та беззубцевим статором.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

Загальний вигляд створеного ВКЛСД схематично показано на рис. 1. Він складається з: корпусу 1; магнітопроводу 2; струмового шару 3; якоря 4; постійних магнітів (NdFeB) 5; концентраторів 6; стрижня якоря 7; платформи 8; рим-болта 9; втулки з'єднувальної 10; підшипника ковзання 11; пружин 12; скоби 13; фланця 14.

Вібратор є машиною зі беззубцевою структурою магнітопроводу статора. Потужність вібратора складає 1,6 кВт, мінімальний повітряний зазор між статором і якорем – 3 мм, немагнітний – 13 мм, амплітуда коливань – 20 мм, маса рухомої частини – 75 кг.

Для розрахунку електромагнітних сил методом скінченних елементів (МСЕ) було створено тривимірну модель цього вібратора, показану на рис. 2, а. Завдяки симетрії у площині ZX моделювалась тільки половина двигуна. Рух якоря під час коливань (його виділено кольором) відбувається по осі Z. Несиметричність розташування якоря змінювалась шляхом його

пересування по осі X. Задача розглядалась у магніто-статичній постановці при нульових струмах в котушках статора, тому котушки не використовувались для тривимірної моделі.

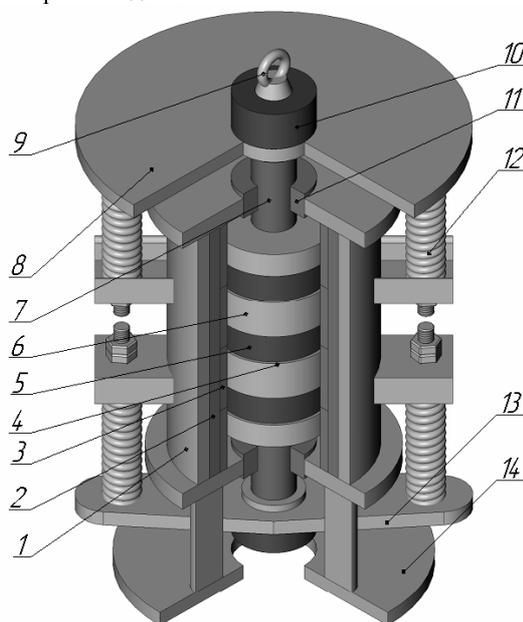


Рис. 1. Загальний вигляд створеного ВКЛСД

Відносна магнітна проникливість сталі прийнята лінійною і становить  $\mu = 1000$ ; для магнітів модуль значення остаточної магнітної індукції  $|\mathbf{B}_r| = 1$  Тл, магнітна проникливість  $\mu_r = 1,06$ , напрямком намагнічування – по вісі Z.

У роботі [5] відзначається, що лінійні двигуни зі зубцевим статором можуть мати щільність сили на одиницю активної поверхні до трьох разів більшу, ніж з беззубцевим. Тому для порівняння в роботі було також розглянуто модель лінійного двигуна зі зубцевим статором (рис. 2, б).

Для порівняння не тільки сил магнітного тяжіння, але і тягових характеристик двох типів двигунів, в роботі були побудовані двовимірні моделі для цих двигунів за методикою, докладно описаною у [4]. Розрахунок вівся за допомогою МСЕ для значення модуля МРС  $|F| = 2130$  А-витків у кожній котушці.

Результати розрахунку тягової сили наведені на рис. 3. З їх аналізу видно, що при зубцевій структурі статора машина має вищі у 2,2-4,8 рази тягові характеристики, ніж при беззубцевій, проте має значну зачіплювальну силу (що діє при нульовому струмі).

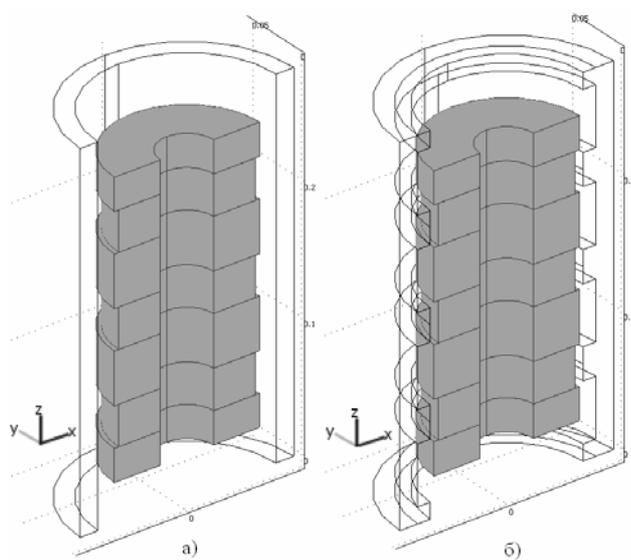


Рис. 2. Тривимірні моделі двигунів з зубцевим (а) і беззубцевим (б) статором при центральному положенні якоря (зміщення  $\Delta z = 0$ , несиметрія  $\Delta x = 0$ )

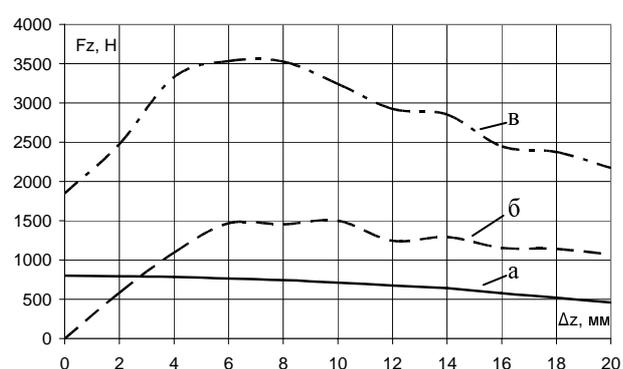


Рис. 3. Розрахункові тягові характеристики. Суцільною лінією (а) показано характеристику для беззубцевої машини, штрихпунктирною (в) – для зубцевої, штриховою (б) – зачіплювальної сили для зубцевої машини

Математична тривимірна модель для розрахунку сил магнітного тяжіння описується таким чином [6].

В області без електричного струму справедливо для напруженості магнітного поля  $\mathbf{H}$ :

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0. \quad (1)$$

Тоді можливо визначити скалярний магнітний потенціал  $V_m$  з відношення:

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m. \quad (2)$$

Вираз (2) є аналогічним до виразу для визначення електричного потенціалу для статичних електричних полів.

Використовуючи базове співвідношення між магнітною індукцією  $\mathbf{B}$  й напруженістю магнітного поля  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} + \mathbf{B}_r. \quad (3)$$

та враховуючи, що

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

можливо записати рівняння для визначення скалярного магнітного потенціалу:

$$\nabla \cdot (-\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \nabla V_m + \mathbf{B}_r) = 0 \quad (5)$$

Інтегрування диференційного рівняння (5) виконувалось за допомогою МСЕ. Розрахунок сил виконувался на основі тензору натягу Максвелла [6].

Було отримано графіки для сил одностороннього магнітного тяжіння  $F_x(x, z)$  в залежності від зміщення  $\Delta z$  та несиметрії  $\Delta x$  якоря відносно статора для зубцевої машини (рис. 4) і залежність  $F_x(x)$  для обох типів машин (рис. 5).

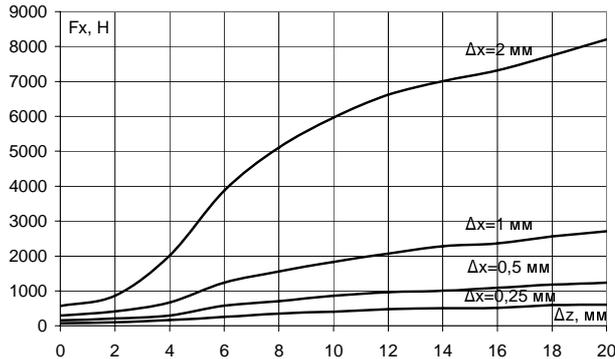


Рис. 4. Сімейство характеристик  $F_x(x, z)$  для двигуна зі зубцевим статором

Аналізуючи тягові характеристики на рис. 4, бачимо, що  $F_x(x, z)$  для зубцевого двигуна суттєво залежить від зміщення  $\Delta z$  якоря під час руху і збільшується з віддаленням від центру, досягаючи свого максимуму в крайньому положенні. Для беззубцевої машини аналогічної залежності не виявлено; сила майже не змінюється в залежності від  $\Delta z$ .

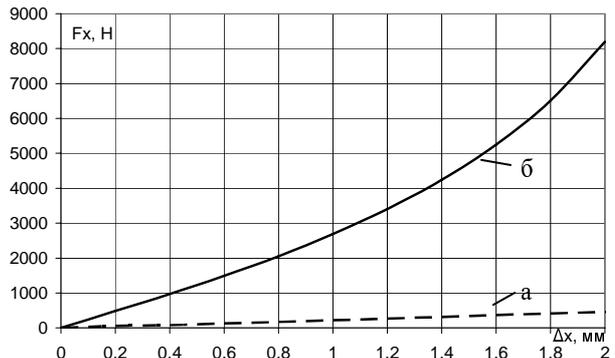


Рис. 5. Залежність  $F_x(x)$  для двигуна з беззубцевим (а) та зубцевим (б) статором при  $\Delta z = 20$  (крайнє положення)

З рис. 5 видно, що  $F_x(x)$  для беззубцевого двигуна зростає майже лінійно на всьому діапазоні моделювання, а для зубцевого – приблизно до значення  $\Delta x = 1$  мм, а далі нелінійно. Сила одностороннього магнітного тяжіння для зубцевої машини перевищує силу для беззубцевої в 9-12 разів на проміжку до 1 мм і в 13-18 разів на проміжку від 1 до 2 мм за рахунок суттєво меншого, у порівнянні з беззубцевою маши-

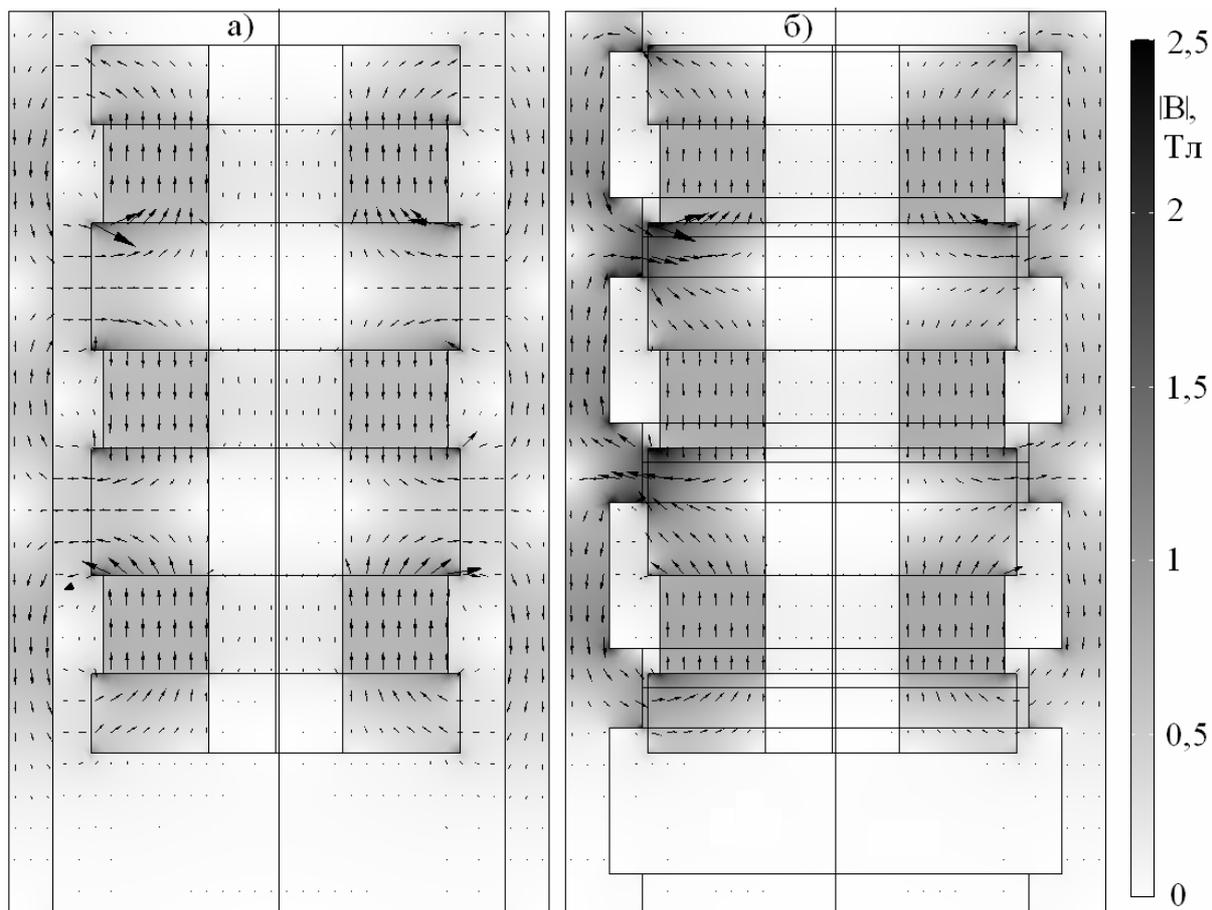


Рис. 6. Значення модуля магнітної індукції  $|B|$  (кольором) та напрям магнітного потоку (стрілками) для беззубцевої (а) і зубцевої (б) машини при зміщенні  $\Delta z = 20$  мм і несиметрії  $\Delta x = 1$  мм

ною, немагнітного зазору між якорем та статором.

На рис. 6 показано значення модуля магнітної індукції для обох типів машин. Видно, що у беззубцевої машини (а) сталь майже не насичена і картина розподілу  $|B|$  приблизно симетрична. У зубцевої машини (б) спостерігається насичення сталевих частин якоря і статора в області меншого немагнітного зазору і має місце суттєва несиметрія у розподілі  $|B|$ .

#### ВИСНОВКИ

1. Тягова характеристика при постійному струмі для вібратора з зубцевим статором перевищує у 2,2-4,8 разів характеристику для вібратора зі беззубцевим статором, проте у нього спостерігається значна величина зачіплювальної сили, яка досягає 40% від значення тягової сили.

2. Сила одностороннього магнітного тяжіння для вібратора зі зубцевим статором перевищує силу для вібратора з беззубцевим статором у 9-18 разів. Ця різниця у значенні сил обумовлена значно меншим мінімальним немагнітним зазором у разі зубцевого статора - змінювався при моделюванні від 3 до 1 мм, а для беззубцевого - від 13 до 11 мм.

3. У залежності від положення якоря при коливанні сила одностороннього магнітного тяжіння змінюється приблизно лінійно для беззубцевого статора, а для зубцевого - нелінійно і залежить від конфігурації зубців на статорі і якорі.

4. Зазначимо, що для уточнення дії сил одностороннього магнітного тяжіння при роботі вібратора потрібно провести моделювання з врахуванням струмів в обмотках статора.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Богасенко М.В., Бондар Р.П., Голенков Г.М., Голуб В.П., Макогон С.А., Павленко П.В., Попков В.С. Вібробудувач. Деклараційний патент на корисну модель №14111 заявка № а 2005 10789 від 15.11.2005.
- [2] Богасенко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Павленко П.В., Попков В.С., Чомкалова І.О. Віброзанурювач. Деклараційний патент на винахід №20031213225 від 17.01.2005.
- [3] Голенков Г.М., Бондар Р.П., Макогон С.А., Богасенко М.В., Попков В.С. Моделювання роботи електричного вібратора з коаксіально-лінійним індукційним двигуном при різних законах регулювання // Технічна електродинаміка. - 2007. - №2 - С. 54 - 59.
- [4] Голенков Г.М., Бондар Р.П., Макогон С.А., Подольцев А.Д., Богаєнко Н.В., Попков В.С. Численний расчёт магнитного поля и основных характеристик электровибратора на основе коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами. - Харьков: "Електротехніка і електромеханіка" №1, 2007. - С. 8 - 12.
- [5] S. Chevailler. Comparative study and selection criteria of linear motors. PhD thesis. Suisse, EPLF, 2006. - p. 167.
- [6] AC/DC module users guide. COMSOL AB, 2006. - 164 pp.

Надійшла 12.05.2008

## СИЛОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЛИНЕЙНОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Милых В.И., д.т.н.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины"  
тел. (0572) 707-65-14; e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua; сайт: http://users.kpi.kharkov.ua/kem/

Ткаченко С.В.

Открытое акционерное общество завод "Потенциал"  
Украина, 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 17  
тел. (0572) 99-81-88; e-mail: potencial@potencial.kharkov.com

*Розглянуті силові взаємодії в лінійному імпульсному електродинамічному двигуні для невибухових джерел сейсмоколиваль, що відрізняється циліндровою електромагнітною системою і її сильним насиченням. Виявлений внесок в загальну тягову силу складових електродинамічного і магнітного походження, а також характер зміни сил залежно від взаємного положення якоря і реактора і ще від МРС їхніх обмоток.*

*Рассмотрены силовые взаимодействия в линейном импульсном электродинамическом двигателе для невзрывных источников сейсмоколебаний, отличающемся цилиндрической электромагнитной системой и ее сильным насыщением. Выявлен вклад в общую тяговую силу составляющих электродинамического и магнитного происхождения, а также характер изменения сил в зависимости от взаимного положения якоря и реактора и еще от МДС их обмоток.*

### ВВЕДЕНИЕ

Линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД), являющийся рабочим органом импульсного электромеханического сейсмоисточника невзрывного характера [1-3], предназначенного для возбуждения в земной коре сейсмических колебаний при поиске нефти, газа и других полезных ископаемых, был представлен в [4-6].

Рассматриваемый ЛИЭД является короткоходным электромеханическим преобразователем и имеет цилиндрическую конструкцию, которая представлена на рис. 1.

Основными элементами двигателя являются порождающие силовое взаимодействие якорь и реактор. Якорь жестко связан с опорной плитой в виде конуса и может перемещаться лишь на весьма малое расстояние, равное упругой деформации грунта, - порядка нескольких миллиметров. Преобладающее же движение под действием развиваемого импульса силы осуществляет реактор в противоположную сторону - вверх. Ограничивает и демпфирует отскок реактора амортизатор. Таким образом, рабочее воздействие на грунт, вызывающее сейсмоколебания, оказывает силовая "отдача" якоря.

Активными электромагнитными элементами реактора и индуктора являются цилиндрические ферромагнитные сердечники с "коллекторной" шихтовкой, в пазах которых расположены секционированные кольцевые обмотки.

На рис.1 показано исходное положение реактора и чередующееся направление тока в обмотках, что обеспечивает заданное направление сил  $F_{em}$  в рабочем режиме при подаче импульса тока.

Мощные импульсы тока в обмотки подаются от емкостного накопителя энергии, который периодически заряжается от источника питания (синхронного генератора, аккумуляторов).

Одной из основных задач, которые решаются при проектировании представленного ЛИЭД, является обеспечение и соответствующий расчет основной силы взаимодействия якоря и реактора, а также ее распределения между обмотками и сердечниками. Основы расчета, которые представлялись в [4-5], построены на весьма упрощенных моделях магнитного поля, а также на некоторых данных, корректируемых по результатам экспериментов. Поэтому такой подход может быть целесообразен только на начальных этапах проектирования как первое приближение.

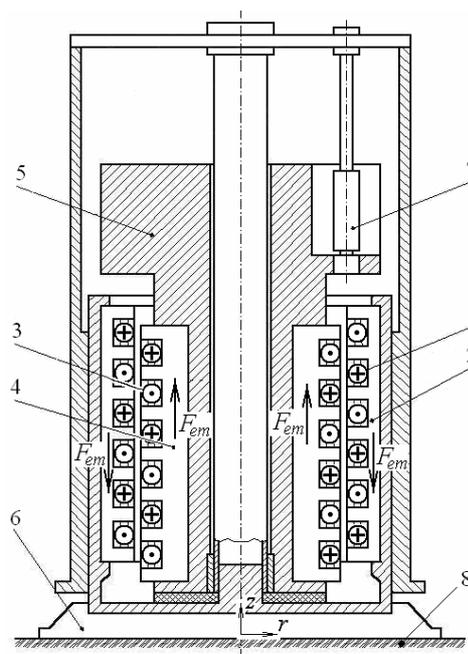


Рис. 1. Устройство линейного электродвигателя:  
1 – обмотка якоря; 2 – магнитопровод якоря; 3 – обмотка реактора; 4 – магнитопровод реактора; 5 – инертная масса; 6 – опорная плита-конус; 7 – амортизатор; 8 – грунт

Сложность решения задачи расчета силовых взаимодействий вызвана, прежде всего, очень сильным насыщением магнитопровода ЛИЭД, а также плохо прогнозируемой организацией магнитного поля при различных взаимных положениях якоря и реактора в процессе работы двигателя. Однако эти проблемы преодолеваются естественным, для современного уровня вычислительной техники, переходом от классических цепных моделей магнитного поля к численно-полевым расчетам.

В связи с отмеченными обстоятельствами, целью данной работы является численно-полевой анализ силовых взаимодействий в ЛИЭД представленной конструкции. А для того, чтобы понимать место этого двигателя в области электрических машин, определим его в соответствии с [6], как электродинамический ЛИЭД с наружным якорем.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИЛ В ЛИЭД

Задача расчета силовых взаимодействий при численно-полевом подходе складывается из двух этапов: сначала рассчитывается магнитное поле с учетом реальной геометрии магнитной системы ЛИЭД и насыщения магнитопровода, а затем на этой основе определяются силовые взаимодействия, а именно силы, действующие непосредственно на обмотки, на магнитопровод и в целом на якорь и реактор.

Учитывая осевую симметрию магнитной системы ЛИЭД, к которой относим ферромагнитные сердечники и обмотки, трехмерное магнитное поле можно рассчитывать в меридиональной плоскости, проходящей через центральную ось симметрии (рис. 1). В обусловленной модели, варианты которой показаны на рис. 2, это поле описывается посредством тангенциальной составляющей векторного магнитного потенциала (ВМП)  $A_\varphi$  дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{\mu \cdot r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} \right\} = -J_\varphi, \quad (1)$$

где  $r, z$  – радиальная и осевая координаты цилиндрической системы;  $J_\varphi$  – угловая составляющая плотности тока в обмотках (в данной постановке вихревыми токами в других элементах конструкции при импульсном возбуждении пренебрегаем);  $\mu$  – магнитная проницаемость.

При решении уравнения (1) в меридиональной плоскости ( $r, z$ ) одной из границ является центральная ось. Прочие границы при численном расчете магнитного поля должны иметь конкретную позицию и выноситься за пределы активной зоны на такое расстояние, где магнитное поле можно считать пренебрежимо малым. В итоге на определенных границах  $\Gamma$  прямоугольной области можно было принять простейшее граничное условие Дирихле – в данном случае для ВМП:

$$A_{\varphi\Gamma} = 0. \quad (2)$$

В представленной формулировке для решения полевой задачи весьма эффективной является программа FEMM [7], которая обеспечивает численные

расчеты на основе метода конечных элементов. При его использовании геометрических искажений области расчета и входящих в нее элементов можно не допускать, а еще учитываются задаваемые кривые намагничивания ферромагнитных сердечников и их шихтовка (в любой координатной плоскости).

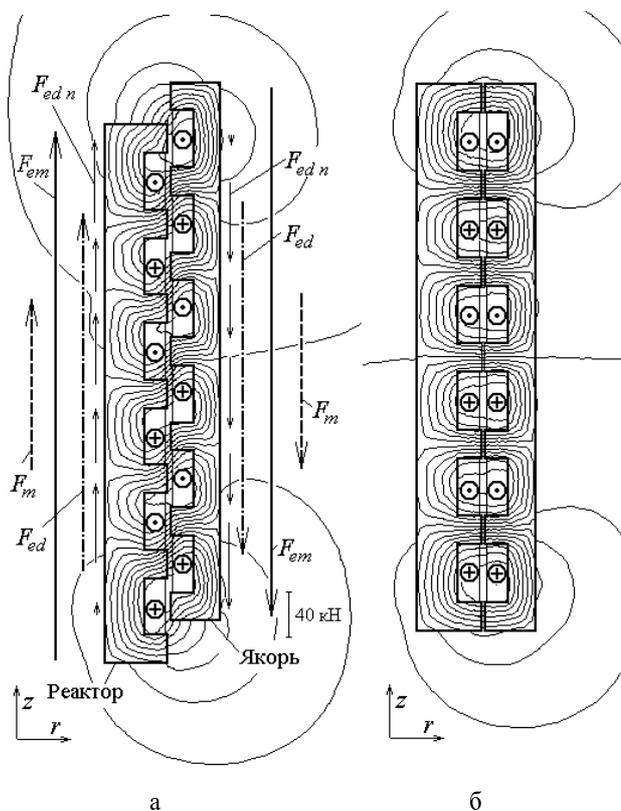


Рис. 2. Симметричные половины сечения магнитной системы ЛИЭД с вариантами расположения реактора: а – исходное положение; б – конечное положение

Как известно [8], полученное решение в виде распределения ВМП позволяет перейти к целому ряду электромагнитных параметров электрических машин.

В данном случае для анализа силовых взаимодействий в ЛИЭД будем использовать следующие виды сил.

Через тензор напряжения Максвелла определяется результирующая электромагнитная сила, взаимодействия реактора и якоря:

$$F_{em} = \frac{2\pi}{\mu_0} \int_{l_\delta} r B_r B_z dl. \quad (3)$$

Здесь  $B_r$  и  $B_z$  – радиальная и аксиальная составляющие магнитной индукции, а интегрирование проводится по контуру  $l_\delta$  в плоскости  $r, z$ , одна из сторон которого обязательно проходит по зазору по координате  $z$ , а остальная часть охватывает полностью сердечник с обмоткой. Это может быть реактор или якорь – результат должен быть одинаковым. Контур полностью проходит по неферромагнитному пространству, поэтому в формуле фигурирует магнитная постоянная  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Результирующая сила в осесимметричной систе-

ме имеет только аксиальную составляющую, т.е. силы  $F_{em}$  действуют на якорь и реактор встречно, как показано на рис.1 и рис.2.

Электродинамические усилия действуют непосредственно на токнесущие элементы – обмотки с током, и определяются базовой формулой на основе закона Ампера:

$$F_{ed} = 2\pi \int_{S_J} r J_{\phi} B_r dr dz, \quad (4)$$

где  $S_J$  – площадь интегрирования по сечению обмотки в одном пазу или во всех пазах – в зависимости от того, какая сила определяется.

Сила  $F_{ed}$ , как и  $F_{em}$ , приходится на весь конкретный кольцевой элемент и поэтому направлена по аксиальной оси ЛИЭД.

Если использовать силу  $F_{ed}$ , действующую на всю обмотку якоря или реактора, то можно получить магнитную силу, приложенную непосредственно к конкретному сердечнику:

$$F_m = F_{em} - F_{ed}. \quad (5)$$

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Перед тем, как представлять и анализировать силовые взаимодействия, приведем основные исходные параметры исследуемого ЛИЭД: внутренний диаметр сердечника реактора – 288 мм; наружный диаметр сердечника якоря – 512 мм; зазор – 2 мм; аксиальная длина сердечников – 533 мм; размеры пазов –  $55 \times 23$  мм<sup>2</sup>; ширина зубцов – 29 мм.

Данный ЛИЭД рассчитан на импульс силы с максимумом, достигающим около 100 тонн. Соответственно было выявлено, что для этого необходим ток в обмотках, при котором МДС  $F_{En}$ , приходящаяся на паз, должна достигать порядка 100 кА. Поэтому при расчетах эта МДС варьировалась от 20 до 100 кА с шагом 20 кА.

Варьировалось также взаимное положение якоря и реактора. Крайние положения представлены на рис. 2: а – исходное положение (зубец против паза), обеспечивающее наибольшую силу; б – конечное положение (зубец против зубца), при котором тяговая сила отсутствует. В этих пределах реактор делает рабочий ход на 42 мм, а расчеты проводились для 8 положений, отличающихся сдвигом на  $\Delta z = 6$  мм.

При расчете магнитного поля программа FEMM сгенерировала конечно-элементную структуру, состоящую примерно из 24 тысяч узлов и 48 тысяч треугольников. Весьма малый фрагмент этой структуры в зоне зазора представлен на рис. 3.

Рассчитываемые магнитные поля частично представлены их картинками на симметричных половинах сечений магнитной системы ЛИЭД на рис. 2. По сути это линии равного магнитного потока  $rA_{\phi} = \text{const}$ , причем крайние значения в области расчета рис. 2,а при максимальной МДС  $F_{En}$  составляют -0,1528 и +0,1575 Вб. А магнитная индукция в этом варианте достигает в зубцах 2,85..2,97 Тл, в спинках сердечников – 1,9..2,7 Тл, в зазоре – 3,5 Тл. В модели рис. 2,б

при той же МДС крайние значения магнитного потока составляют -0,1671 и +0,1663 Вб. Магнитная индукция в зубцах и зазоре достигает порядка 4 Тл.

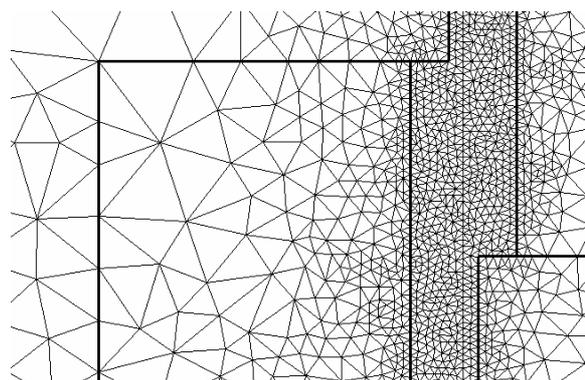


Рис. 3. Фрагмент конечно-элементной структуры

Более подробный анализ проведем, в соответствии с названной выше целью статьи, для различных сил, определенных формулами (3)-(5).

На рис. 2,а для данного расчетного варианта при  $F_{En} = 100$  кА векторами в указанном масштабе представлена целая совокупность сил. Электродинамические силы  $F_{edn}$  приходятся на часть обмотки, заключенную в каждом конкретном пазу (силы показаны напротив конкретных пазов якоря и реактора, но для удобства изображения вынесены за пределы сердечников). Обращает внимание то, что эти силы по пазам распределены неравномерно.

Показаны также векторы результирующих сил  $F_{em}$ ,  $F_{ed}$  и  $F_m$  по формулам (3)-(5), приходящиеся на реактор и индуктор (изображение с соответствующей стороны). Здесь очевидно, что в тяговую силу  $F_{em}$  основной вклад дает именно электродинамическая сила  $F_{ed}$ : отсюда и классификационный признак данного ЛИЭД - электродинамический. Сила  $F_m$  хотя и меньше, но, тем не менее, также дает заметный вклад в тяговую силу, и пренебречь этим нельзя. Известно, что в классических электрических машинах с менее насыщенными сердечниками (особенно – зубцами) все наоборот: подавляющее значение имеет сила типа  $F_m$ , а сила типа  $F_{ed}$  - несущественна.

Зависимости результирующих сил  $F_{em}$  и  $F_{ed}$  от взаимного положения реактора и якоря в пределах крайних, представленных на рис.2, даны на рис.4, причем для пяти представленных ранее значений МДС  $F_{En}$ , приходящейся на один их паз. Заметим, что при меньших значениях  $F_{En}$  и, соответственно меньших насыщениях магнитопровода, относительный вклад силы  $F_{ed}$  в тяговую силу  $F_{em}$  оказывается не столь существенным, как при максимальной МДС, т.е. при очень сильном насыщении.

Очевидно также, что при меньших насыщениях максимум силы  $F_{em}$  достигается не в крайнем положении индуктора, т.е. не при  $z=0$ .

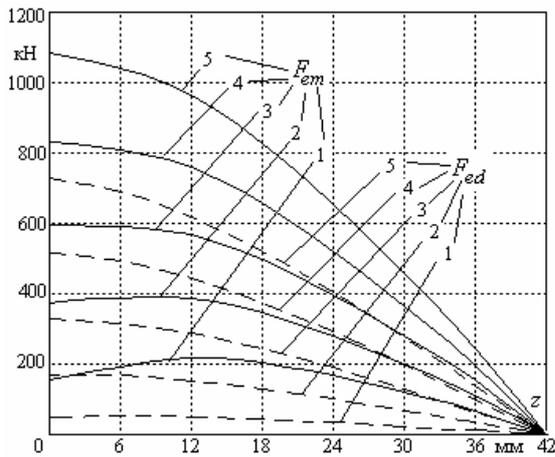


Рис. 4. Изменение результирующих сил  $F_{em}$  и  $F_{ed}$  при различных положениях реактора ( $z=0$  – исходное по рис. 2,а;  $z=42$  мм – конечное по рис. 2,б) и при разных значениях МДС  $F_{En}$ : 1 – 20 кА; 2 – 40 кА; 3 – 60 кА; 4 – 80 кА; 5 – 100 кА

Для более очевидной зависимости силового взаимодействия реактора и индуктора от МДС  $F_{En}$  на рис.5 представлены графики тяговой силы  $F_{em}$  в функции от этой МДС для указанных значений  $z$ . Эти зависимости приближаются к линейным, хотя при отсутствии быстро наступающего сильного насыщения и, тем более, при ненасыщенном магнитопроводе характер графиков напоминает бы параболу.

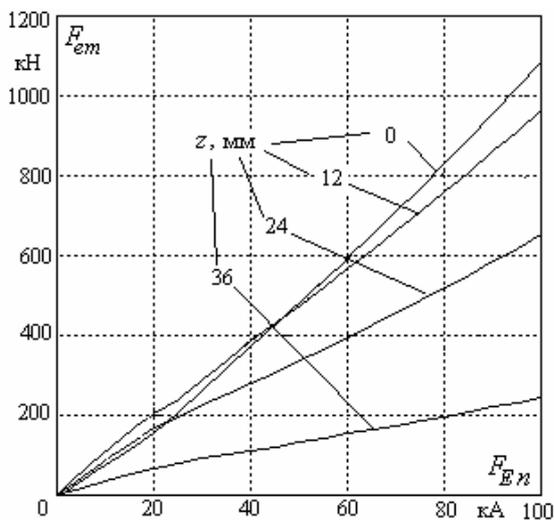


Рис. 5. Изменение результирующей силы  $F_{em}$  в зависимости от МДС  $F_{En}$  при различных положениях реактора

### ВЫВОДЫ

1. Основной особенностью рассмотренного ЛИЭД, предопределяющей распределение ролей сил разного происхождения и характер их зависимостей от взаимного расположения индуктора и реактора, а также от МДС обмоток, является очень сильное насыщение ферромагнитных сердечников.

2. При максимальном возбуждении и соответственно при сильном насыщении в итоговую тяговую силу ЛИЭД основной вклад дают электродинамиче-

ские силы, действующие непосредственно на обмотки, что является основанием для классификационного признака данного ЛИЭД - электродинамический.

3. Несмотря на преобладающий характер электродинамических сил, магнитная сила, действующая непосредственно на сердечники, также дает заметный вклад в тяговую силу, и пренебречь этим нельзя. Особенно это касается работы при меньших насыщениях магнитопровода, когда магнитная сила становится преобладающей.

4. Электродинамические силы, действующие непосредственно на проводники обмотки, по пазам вдоль длины ЛИЭД распределены неравномерно.

5. При сильном насыщении магнитопровода максимум силы развивается при сдвиге сердечников якоря и реактора на половину зубцового деления, а при меньших насыщениях этот максимум достигается после смещения реактора в сторону по ходу его движения из этой позиции.

6. Зависимости силового взаимодействия реактора и индуктора от МДС обмоток приближаются к линейным, в отличие от известного факта параболической зависимости в обычных электромагнитных системах с относительно слабым насыщением.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник. М., "Недра", 1992.
- [2] Шнейерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная сейсморазведка с невзрывными источниками колебаний. М., "Недра", 1980.
- [3] Ямпольский Ю.Г. Анализ основных типов силовых линейных импульсных электрических двигателей // Электротехника.-1992.-№8-9.- С. 4-11.
- [4] Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко В.П., Ткаченко С.В., Фатенко А.Ю., Осташевский Н.А. Линейные импульсные электродинамические двигатели для невзрывных источников сейсмических колебаний // Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Электроэнергетика и преобразовательная техника.- Харьков: НТУ "ХПИ". - 2006. - №38.- С. 83-92.
- [5] Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко В.П., Ткаченко С.В., Фатенко А.Ю., Осташевский Н.А. "Машинная постоянная" линейного импульсного электродинамического двигателя для невзрывного источника сейсмических колебаний. // Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2007. - №24.- С. 5-10.
- [6] Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко С.В., Милых В.И. Выбор типа и основных параметров линейного импульсного электродвигателя для невзрывных сейсмических источников. // Электротехніка і електромеханіка.-2008.-№3.- С. 41-44.
- [7] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.
- [8] Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехніка і електромеханіка.-2006.-№2.- С. 40-46.

Поступила 29.08.2008

## ПАРАМЕТРЫ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Радимов И.Н., к.т.н., доц., Гулый М.В.  
 ООО "Завод "Электротехника"  
 Украина, 54028, Николаев, ул. Новозаводская, 19  
 тел. (048) 738-58-55, E-mail: office@zelnk.com

Рымша В.В., д.т.н., проф., Чан Тхи Тху Хыонг  
 Одесский национальный политехнический университет  
 Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра электрических машин  
 тел. (048) 738-58-55, E-mail: rimsha61@gmail.com, office@zelnk.com

*Наведено розрахунок та ідентифікація параметрів явнополюсного вентильного двигуна з постійними магнітами.*

*Приведен расчет и идентификация параметров явнополюсного вентильного двигателя с постоянными магнитами.*

Заводом "Электротехника" в настоящее время осваивается выпуск вентильных двигателей с постоянными магнитами (ВДПМ) и мотор-редукторов, построенных на базе ВДПМ, для медицинской техники, сварочного оборудования, насосных систем, спецтехники и т.д. [1].

Во всех выпускаемых ВДПМ принята единая идеология конструктивного исполнения, а именно: статор выполняется явнополюсным с малым числом полюсов (зубцов), обмотка статора – катушечная с шагом  $y=1$ , ротор содержит постоянные магниты марки NdFeB. Один из возможных вариантов конструкции трехфазного ВДПМ с числом зубцов статора  $Z_S=6$  и числом полюсов ротора  $2p=8$  представлен на рис. 1.

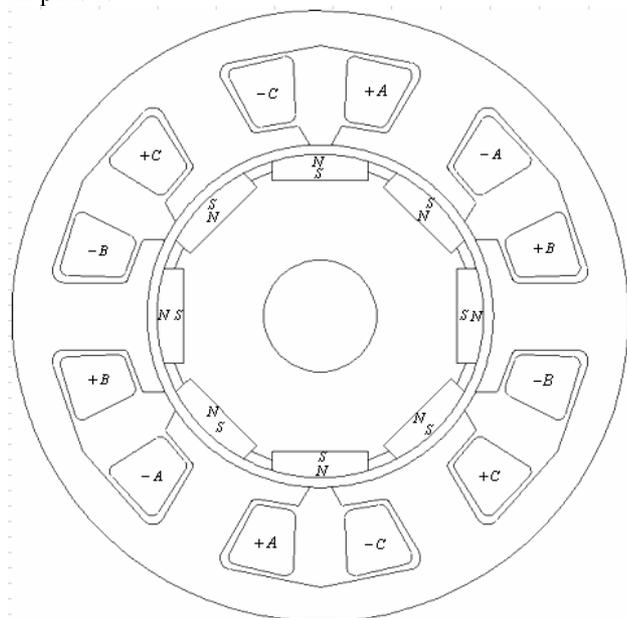
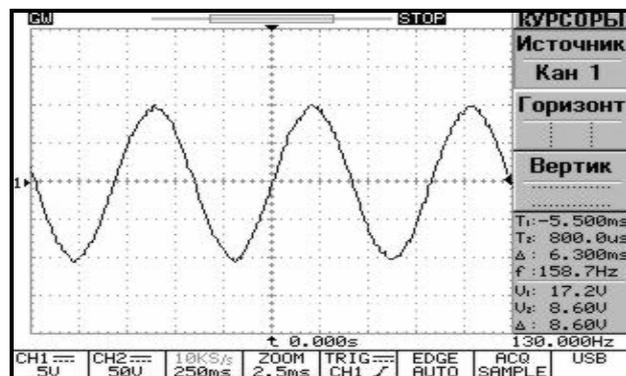


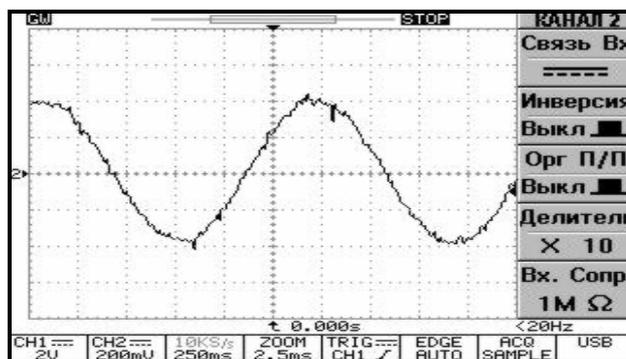
Рис. 1. Поперечное сечение ВДПМ

Несмотря на явнополюсную конструкцию статора с малым числом зубцов и числом пазов на полюс и фазу  $q=1/4$ , как фазные, так и линейные ЭДС в ВДПМ с оптимальными геометрическими соотношениями зубцовой зоны, минимизирующими величину реактивного момента, получаются синусоидальной

формы. Это иллюстрируется рис. 2, где приведены экспериментальные зависимости линейной и фазной ЭДС в функции времени  $e=f(t)$ , записанные с помощью цифрового осциллографа марки GDS-840S.



а)



б)

Рис. 2. Линейная (а) и фазная (б) ЭДС обмотки статора

Представленные на рис. 2 зависимости получены для ВДПМ, данные которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Внешний диаметр, мм	57
Внутренний диаметр статора, мм	29
Длина активной части, мм	15
Воздушный зазор, мм	0,65
Высота магнита, мм	2,2
Число витков катушки обмотки статора	44
Схема соединения обмотки	Y

Линейная ЭДС (рис. 2,а) снималась на зажимах обмотки статора при вращении ротора со скоростью  $\omega=200 \text{ с}^{-1}$ , а фазная ЭДС (рис. 2,б) определялась с помощью пробной обмотки с числом витков  $N = 11$  при вращении ротора со скоростью  $\omega=110 \text{ с}^{-1}$ .

Из представленных осциллограмм следует, что, вследствие синусоидальности ЭДС, ВДПМ данной конструкции имеет широкие возможности применения как в простых электроприводах со 120-градусной коммутацией транзисторных ключей, так и в прецизионных электроприводах с векторным управлением.

Для анализа динамических и квазиустановившихся режимов работы такого двигателя используется система уравнений, записанная в координатных осях ( $d; q$ ) [2]:

$$\begin{cases} u_d = r_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q; \\ u_q = r_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Psi_m; \\ M_{\Sigma} = \frac{3}{2} p [i_q \Psi_m + i_d i_q (L_d - L_q)]; \\ J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\Sigma} - M_C, \end{cases} \quad (1)$$

где  $r_s$  - активное сопротивление обмотки статора;  $L_d, L_q$  - продольная и поперечная индуктивности;  $\Psi_m$  - максимальное потокосцепление обмотки статора с потоком ротора;  $\omega$  - скорость вращения ротора;  $M_{\Sigma}$  - электромагнитный момент;  $J_{\Sigma}$  - суммарный момент инерции;  $M_C$  - момент сопротивления.

Для решения системы уравнений (1) необходимо знать индуктивности  $L_d, L_q$  и потокосцепление  $\Psi_m$ , которые могут быть получены в результате решения полевой задачи. Полевая модель является достаточно точной для этих целей, т.к. позволяет учесть реальную геометрию ВДПМ, насыщение стали, характеристики постоянных магнитов. Для нахождения индуктивностей  $L_d, L_q$  были проведены полевые расчеты для двух положений ротора при МДС катушки обмотки статора  $F_s=0 \text{ А}$  и  $F_s=66 \text{ А}$ . При этом две фазы обмотки статора включались последовательно, т.е. из шести катушек задействованы четыре.

На рис. 2 показано распределение магнитного поля при ориентации ротора по оси  $d$ . Сопоставление распределения векторного магнитного потенциала на рис. 2,а ( $F_s=0 \text{ А}$ ) и рис. 2,б ( $F_s=66 \text{ А}$ ) показывает, что реакция якоря является намагничивающей, о чем свидетельствует увеличение числа магнитных силовых линий.

Максимальное потокосцепление  $\Psi_m$  обмотки статора с потоком ротора:

$$\begin{aligned} \Psi_m &= 2 \cdot n_k \cdot (\Phi_{1_{F_s=0}} + \Phi_{2_{F_s=0}}) = \\ &= 2 \cdot 44 \cdot (7.048 + 7.047) \cdot 10^{-5} = 0.0124 \text{ Вб} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n_k$  - число витков катушки обмотки статора,  $\Phi_{1_{F_s=0}}, \Phi_{2_{F_s=0}}$  - магнитные потоки через зубцы статора (см. рис. 2) при МДС катушки обмотки статора  $F_s=0 \text{ А}$ .

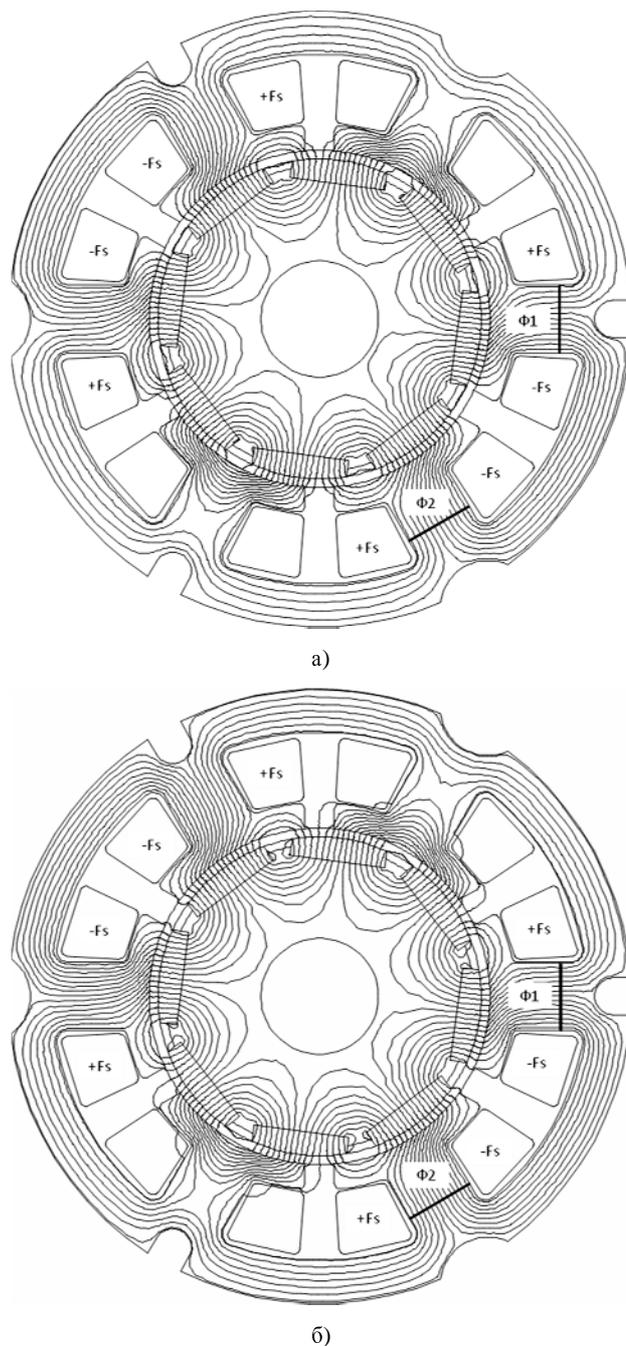


Рис. 2. Магнитное поле ВДПМ по оси  $d$  при  $F_s=0$  (а) и  $F_s=66 \text{ А}$  (б)

Индуктивность  $L_d$  по продольной оси по данным полевого расчета определяется следующим образом:

$$L_d = \frac{2 \cdot n_k^2 \cdot (\Phi_{1_{F_s=66}} - \Phi_{1_{F_s=0}} + \Phi_{2_{F_s=66}} - \Phi_{2_{F_s=0}})}{F_s}, \quad (3)$$

где  $\Phi_{1_{F_s=66}}, \Phi_{2_{F_s=66}}$  - магнитные потоки при  $F_s=66 \text{ А}$ .

На рис. 3 показано распределение магнитного поля при ориентации ротора по оси  $q$ . По отношению к оси  $d$  ротор смещен против часовой стрелки на механический угол  $22,5^\circ$  ( $90 \text{ эл. град.}$ ).

Таблица 2

	$\Phi_{1_{F_s=0}}$	$\Phi_{2_{F_s=0}}$	$\Phi_{1_{F_s=66}}$	$\Phi_{2_{F_s=66}}$	$L$
	$В6 \cdot 10^{-5}$	$В6 \cdot 10^{-5}$	$В6 \cdot 10^{-5}$	$В6 \cdot 10^{-5}$	мГн
Ось $d$	7.048	7.047	8.459	8.458	1.656
Ось $q$	-4.084	4.092	-2.736	5.433	1.578

Данные табл. 2 подтверждают известный факт о том, что у двигателей с постоянными магнитами индуктивности по осям  $d$  и  $q$  мало отличаются [3]. В данном случае их отличие не превышает 5%.

Для идентификации значения индуктивности обмотки статора  $L_S \approx L_d \approx L_q$  был проведен эксперимент на установке, схема которой представлена на рис. 4.

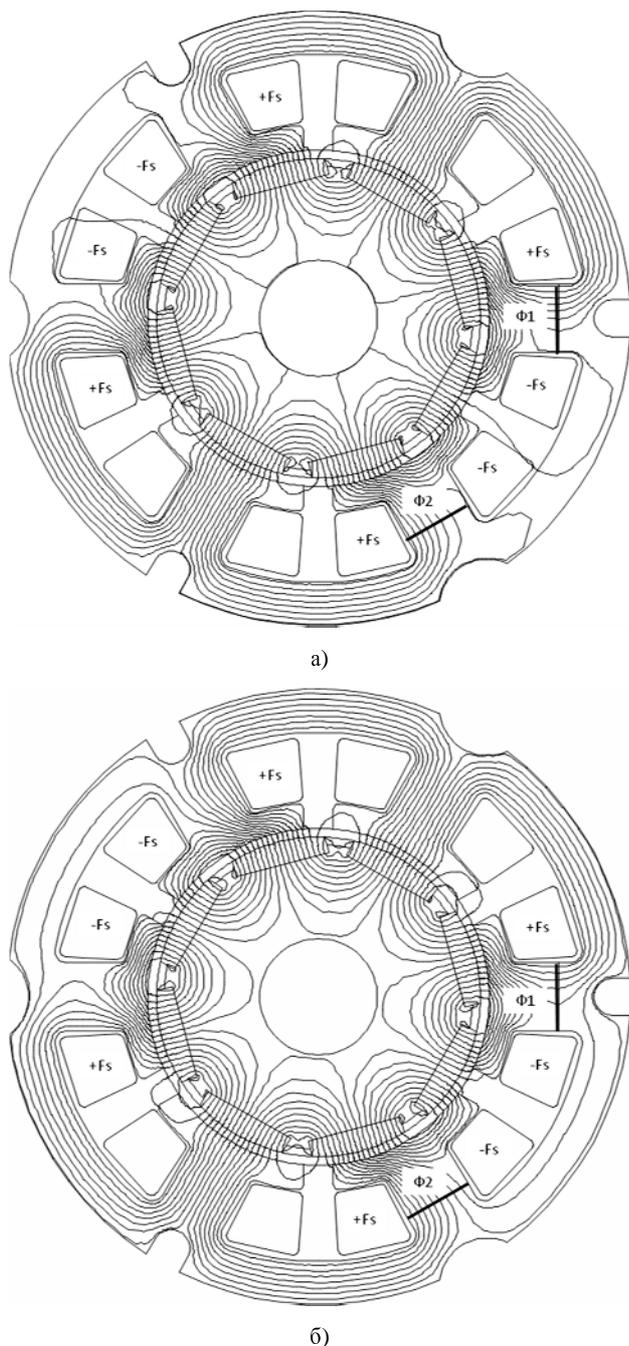


Рис. 3. Магнитное поле ВДПМ по оси  $q$  при  $F_s=0$  (а) и  $F_s=66$  А (б)

Индуктивность  $L_q$  по поперечной оси по данным полевого расчета определяется следующим образом:

$$L_q = \frac{2 \cdot n_k^2 \cdot (\Phi_{1_{F_s=66}} - \Phi_{1_{F_s=0}} + \Phi_{2_{F_s=66}} - \Phi_{2_{F_s=0}})}{F_s}, \quad (4)$$

где  $\Phi_{1_{F_s=0}}$ ,  $\Phi_{2_{F_s=0}}$  - магнитные потоки (см. рис. 3) при МДС катушки обмотки статора  $F_s=0$  А,  $\Phi_{1_{F_s=66}}$ ,  $\Phi_{2_{F_s=66}}$  - магнитные потоки при  $F_s=66$  А.

Результаты определения магнитных потоков и результаты расчета индуктивностей по (3) и (4) сведены в табл. 2.

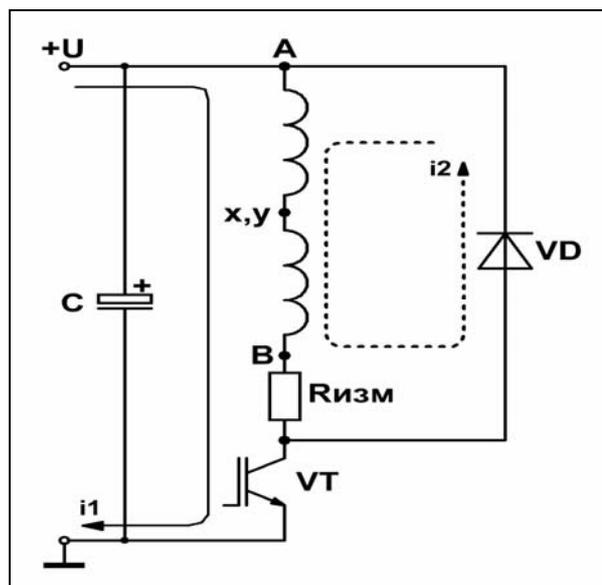


Рис. 4.

В данной схеме при подаче однополярного питания  $+U$  осуществляется импульсное регулирование тока, проходящего через две последовательно включенные фазы статора (Ах, уВ). Ротор ВДПМ при этом автоматически ориентируется по оси  $d$ . Амплитуда изменения тока составляет  $\Delta i$ , измерение тока выполняется резистором  $R_{изм}$ .

При включении транзистора VT уравнение электрического равновесия для цепи  $[+U - Ax - yB - R_{изм} - VT - \text{общий провод}]$ :

$$U = R_1 \cdot i_1 + L_S \frac{di_1}{dt}, \quad (5)$$

где  $R_1$  - активное сопротивление контура прохождения тока  $i_1$ ,  $t$  - время. В данном режиме работы схемы  $\frac{di_1}{dt} > 0$ .

При выключении транзистора VT уравнение электрического равновесия для цепи  $[Ax - yB - R_{изм} - \text{диод VD}]$ :

$$0 = R_2 \cdot i_2 + L_S \frac{di_2}{dt}, \quad (6)$$

где  $R_2$  - активное сопротивление контура прохождения

ния тока  $i_2$ . В этом режиме  $\frac{di_2}{dt} < 0$ .

График изменения тока двигателя в функции времени, построенный по результатам эксперимента, приведен на рис. 5.

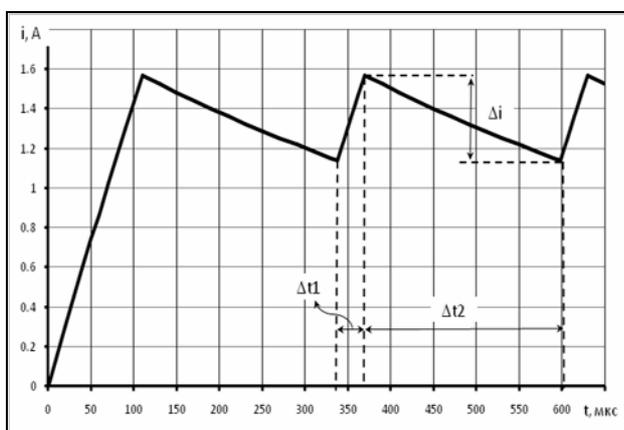


Рис. 5. График изменения тока ВДПМ

Из уравнений (5), (6) могут быть получены средние значения токов  $I_1$  и  $I_2$  за интервалы времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  в квазиустановившемся режиме регулирования тока:

$$I_1 = \frac{U - L_S \frac{\Delta i_1}{\Delta t_1}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{-L_S \frac{\Delta i_2}{\Delta t_2}}{R_2}. \quad (7)$$

Исходя из того, что  $\Delta i_1 = -\Delta i_2 = \Delta i$ ,  $I_1 = I_2$  и считая, что  $R_1 \approx R_2$  индуктивность статора определяется так:

$$L_S = \frac{U}{\Delta i} \cdot \frac{\Delta t_1 \cdot \Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2}. \quad (8)$$

По экспериментальным данным  $U = 24,1$  В,  $\Delta i = 0,43$  А,  $\Delta t_1 = 32$  мкс,  $\Delta t_2 = 228$  мкс. Тогда индуктивность по (8)  $L_S = 1,572$  мГн, что близко к расчетному значению, полученному исходя из решения полевой задачи. Здесь же отметим, что полевая задача решалась в плоской постановке, при которой вклад лобовых частей обмотки статора в общую индуктивность не учитывается. Однако, ввиду того, что в рассматриваемой конструкции ВДПМ с явно выраженными полюсами и вылет лобовых частей мал, результат расчета индуктивности в плоской постановке полевой задачи получается достаточно корректным.

Для дополнительной проверки правильности идентификации индуктивности обмотки статора и ввода в расчет условия  $R_1 \approx R_2$  по уравнениям (7) определим значения активных сопротивлений контуров прохождения токов  $i_1$  и  $i_2$ . В эксперименте при регулировании ток обмотки статора изменялся в пределах от 1,14 А до 1,57 А, т.е. его среднее значение составило  $I = 1,355$  А.

Тогда по (7) сопротивление  $R_1 = 2,19$  Ом, сопротивление  $R_2 = 2,2$  Ом. В то же время собственное сопротивление обмотки статора при температуре 20 °С

составляет 1,57 Ом, а сопротивление токоизмерительного резистора в схеме по рис. 4  $R_{изм} = 0,2$  Ом. Учитывая сопротивление полупроводниковых приборов VT и VD, можно сделать вывод о достаточно хорошем соответствии расчетных значений сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  реальным значениям сопротивлений этих контуров.

На рис. 6 представлена расчетная механическая характеристика исследуемого в данной работе ВДПМ, полученная на основе решения системы уравнений (1) с учетом изложенной выше методики определения индуктивностей обмотки статора по осям  $L_d, L_q$  и потокоцепления  $\Psi_m$ . Также на рис. 6 представлена экспериментальная механическая характеристика ВДПМ. Сопоставление расчетной и экспериментальной механических характеристик позволяет сделать заключение о том, что решение полевой задачи в двухмерной постановке дает возможность с достаточной точностью определить все необходимые данные для расчета динамических режимов электропривода с явнополюсным ВДПМ.

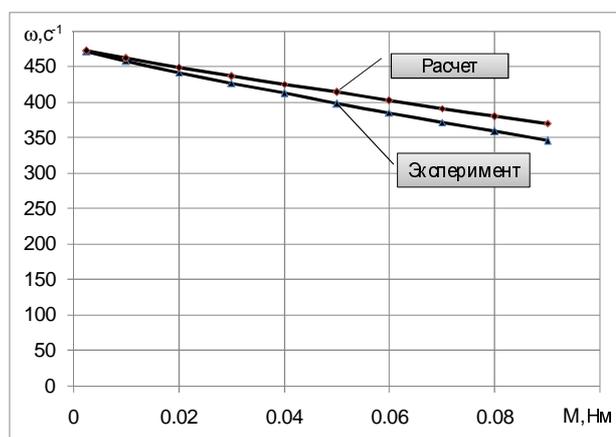


Рис. 6. Механические характеристики ВДПМ

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Калужный А.Н., Рымша В.В. Вентильные электродвигатели и электроприводы производства николаевского завода "Электротехника" // Рынок электротехники. – 2007. № 4(8). – С. 90.
- [2] Столов Л.А., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.
- [3] Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путьков В.В. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. Отд-ние, 1988. – 184 с.

Поступила 03.04.2008

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СЕЛЕКТИРУЮЩИЕ КОНТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РАЗНОТИПНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Гетьман А.В., к.т.н.

Научно-технический центр магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины  
Украина, 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19  
тел. (0572) 99-11-75

*Досліджуються практичні аспекти просторового гармонічного аналізу з метою наближення до поверхні технічних об'єктів області, доступної для аналітичного опису зовнішнього магнітного поля. Теоретично обґрунтована просторова конфігурація селектуючих контурів систем виміру сферичних і сфероїдальних гармонік магнітного поля. Узагальнено методику застосування контурних вимірвальних систем для визначення амплітудних коефіцієнтів різнотипних гармонік скалярного магнітного потенціалу.*

*Исследуются практические аспекты пространственного гармонического анализа с целью приближения к поверхности технических объектов области, доступной для аналитического описания внешнего магнитного поля. Теоретически обоснована пространственная конфигурация селективирующих контуров систем измерения сферических и сфероидальных гармоник магнитного поля. Обобщена методика применения контурных измерительных систем для определения амплитудных коэффициентов разнотипных гармоник скалярного магнитного потенциала.*

### ВВЕДЕНИЕ.

В настоящее время задачи анализа и синтеза магнитного поля технических объектов являются актуальными. Для их решения используют богатый арсенал расчетных и аналитических методов. Среди аналитических методов можно выделить [1], основанные на пространственном гармоническом анализе (ПГА), как наиболее универсальные в плане исследования магнитного поля (МП) различных технических объектов (ТО).

Однако практическое проведение ПГА МП вблизи поверхности ТО возможно лишь при знании амплитуд ряда пространственных гармоник, позволяющего с необходимой точностью восстанавливать магнитное поле во всей области практического использования модели. В свою очередь измерение достаточного количества и с необходимой точностью амплитуд пространственных гармоник связано с затруднениями технического и методического характера [2]. Тем самым методическая погрешность выделения вклада каждой гармоники в суммарный скалярный потенциал, ограниченность количества измеряемых гармоник и технологические сложности эксплуатации существующих измерительных систем являются сдерживающим фактором на пути применения ПГА МП вблизи поверхности ТО.

Как известно [3], разработанные ранее динамические контурные измерительные системы, для практического определения полного набора мультипольных коэффициентов построены на интегральном методе измерения. Измеряемой величиной в них является магнитный поток, пронизывающий контурные обмотки специальной конфигурации [4]. Благодаря специальной форме контуров, поток в них оказывается состоящим из суммы вкладов мультиполей только одного порядка.

Однако, как поиск пространственной конфигурации селективирующих контуров, так и разработка методики обработки сигнатур изначально проводилось для

мультипольных коэффициентов. Между тем мультипольная модель имеет ограничения на использование вблизи ТО, и поэтому не является универсальной в плане применения к источникам с различной геометрией.

С другой стороны обобщенный метод ПГА [5] изначально предопределяет практическую возможность его применения к ТО с различными соотношениями их габаритных размеров на единой метрологической базе. В связи с чем, очевидна необходимость использования теоретических основ обобщенного метода ПГА для построения аналогичной динамической контурной системы, позволяющей проводить селекцию и измерение как сферических, так и сфероидальных гармоник магнитного поля. Для чего необходимо провести поиск пространственной конфигурации контуров, селективирующих разнотипные пространственные гармоники заданного порядка.

Целью работы является синтез универсальных селективирующих контуров измерительной системы сферических и сфероидальных гармоник МП ТО.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обобщенный метод ПГА использует общее представление базисных решений уравнения Лапласа - для вытянуто-сфероидальных, сферических и сплюснuto-сфероидальных гармоник [6] в виде:

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sigma F_n^m(x_1) \cdot \sigma P_n^m(x_2) \begin{cases} \sigma C_n^m \cdot \cos m\varphi \\ \sigma S_n^m \cdot \sin m\varphi \end{cases}, \quad (1)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – соответствующие "радиальная" и "угловая" координаты;

$n$  и  $m$  – соответственно степень и порядок пространственной гармоники;

$\sigma F_n^m(x_1)$  и  $\sigma G_n^m(x_2)$  – "радиальная" и "угловая" функциональные зависимости пространственных гармоник [6], тип которых определяется параметром  $\sigma$ , так что при  $\sigma=1$  они вытянутосфероидальные, при  $\sigma=2$  – сферические, а при  $\sigma=3$  – сплюснутосфероидальные;

$c_n^m, s_n^m$  – амплитуды соответствующих пространственных гармоник скалярного потенциала магнитного поля.

Будим исходить из того, что величина  $\Phi$  является результатом измерения МП, сцепленного с селективирующим контуром, находящимся в воздухе с относительной проницаемостью  $\mu=1$ , и подлежит дальнейшей обработке для определения амплитуд пространственных гармоник. При этом ключевым моментом разработки селективирующих контуров динамических измерительных систем является использование представления пространственной гармоники скалярного потенциала магнитного поля через его векторный потенциал.

$$\vec{A} = -\mu_0 \nabla \times \left( \frac{h_\varphi}{h_2} \int \frac{h_1 h_2}{h_\varphi} U dx_1 \cdot \vec{e}_{x_1} \right), \quad (2)$$

где  $h_1, h_2, h_\varphi$  – коэффициенты Ламе для соответственно "радиальной", "угловой" и циклической координат;  $\vec{e}_{x_1}$  – единичный вектор в направлении координаты  $x_1$ .

Такое представление (2) позволяет проводить синтез пространственной конфигурации селективирующих контуров, если воспользоваться выражением магнитного потока через векторный потенциал и элемент длины контура  $d\vec{l}$

$$\Phi = \oint_L \vec{A} d\vec{l}. \quad (3)$$

При этом именно специальная пространственная конфигурация контура  $L$  интегрирования в (3) "превращает" его в аппаратный фильтр пространственных гармоник заданного порядка.

#### СЕЛЕКЦИЯ ЗОНАЛЬНЫХ ГАРМОНИК

Очевидно, что наиболее простую форму интеграл (3) примет, если проводить интегрирование только по циклической координате. Для всех трех типов используемых систем координат такой является координата  $\varphi$ . В самом простом случае геометрической конфигурации мы имеем круговой контур радиуса  $R_0$ , параллельный плоскости  $ХОУ$ , с центром на оси аппликата. При этом элемент длины контура  $d\vec{l}$  является функцией только координаты  $\varphi$ . Представим  $\varphi$ -тую составляющую векторного потенциала (единственно дающую вклад в магнитный поток) в виде

$$\begin{aligned} A_\varphi &= \mu_0 \frac{h_1}{h_2} \int \frac{\partial U(x_1, x_2, \varphi)}{\partial x_2} dx_1 = \\ &= \mu_0 \frac{h_1}{h_2} \int \frac{\partial U(x_1, x_2)}{\partial x_2} dx_1 \cdot U(\varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

Из вида скалярного магнитного потенциала, представленного базисными решениями (1), следует одинаковость их функциональной зависимости от циклической координаты  $\varphi$ . Поэтому (3) можно переписать как

$$\Phi = \mu_0 \frac{h_1}{h_2} \int \frac{\partial U(x_1, x_2)}{\partial x_2} dx_1 \cdot \oint_L U(\varphi) d\vec{l}_\varphi. \quad (5)$$

Воспользовавшись геометрическим условием для представления элемента длины контура и ортогональностью тригонометрических функций, получим окончательное выражение для потока в виде

$$\Phi = 2\pi\mu_0 R_0 \frac{h_1}{h_2} \int \frac{\partial U_n^0(x_1, x_2)}{\partial x_2} dx_1. \quad (6)$$

Таким образом, мы показали в (6), что круговой контур аксиально-симметричный аппликате представляет собой аппаратный фильтр, выделяющий суммарный вклад зональных ( $m=0$ ) гармоник в пронизывающем его магнитном потоке. Причем такая селекция одинаково характерна для вытянуто-сфероидального, сферического и сплюснуто-сфероидального базисных решений.

#### СЕЛЕКЦИЯ ТЕССЕРАЛЬНЫХ ГАРМОНИК

Проведем поиск возможных вариантов специальной конфигурации селективирующих контуров для использования их в качестве аппаратного фильтра тессеральных гармоник порядка  $m'$ , основываясь на следующих положениях.

Поскольку определение зональных амплитудных коэффициентов проводится при прохождении источника поля через круговой контур по его оси симметрии, то очевидна необходимость использования того же перемещения и при определении остальных (тессеральных) амплитудных коэффициентов. Поэтому селективирующий контур тессеральной гармоники должен располагаться вместе с круговым контуром на цилиндре, ось которого совпадает с трассой перемещения. Для выделения гармоник, имеющих порядок  $m'$ , из магнитного потока  $\Phi$ , представленного через векторный потенциал в выражении (3) воспользуемся ортогональностью тригонометрических функций, входящих в векторный потенциал в (2). Поскольку функциональные зависимости векторного потенциала от координаты  $\varphi$  для сферического и сфероидальных случаев идентичны, то такой контур должен выделять как сферические, так и сфероидальные амплитудные коэффициенты порядка  $m'$ .

Однако применение свойства ортогональности для тригонометрических функций, входящих в векторный потенциал (3) возможно, если линия контура, во-первых, ортогональна ортам радиальной и угловой координат, а во-вторых, имеет косинусоидальную (синусоидальную) функциональную зависимость от циклической координаты. Кроме того, такой контур не должен содержать трассу перемещения – ось аппликата. Иначе в сцепленном с ним магнитном потоке появится вклад гармоник с осевой симметрией – зональных. Трудность совмещения предыдущих и последнего условия преодолевается, если использовать вместо одного два осе симметричных, но противоположно коммутированных контура. Потребовав, чтобы плоскость суммарного контура, образованного двумя функциональными от  $\varphi$  круговыми линиями, была параллельна ап-пликату. Другими словами чтобы радиусы кругов были одинаковыми, а образовавшейся суммарный контур лежал на цилиндре, осью которого является трасса перемещения  $ТО$ . Тогда суммарный контур будет описываться разностью функциональ-

ных зависимостей линий контуров, лежащих на цилиндре. Выберем эти функциональные зависимости  $L_1(\varphi)$  и  $L_2(\varphi)$  такими, чтобы выделялся бы вклад гармоник порядка  $m'$ , например, как на рис. 1. Т.е. чтобы  $L_1(\varphi)$  и  $L_2(\varphi)$  задавали отклонение вдоль цилиндра от круговой линии симметрии двух контуров в зависимости от циклической координаты и находились бы в противофазе друг к другу.

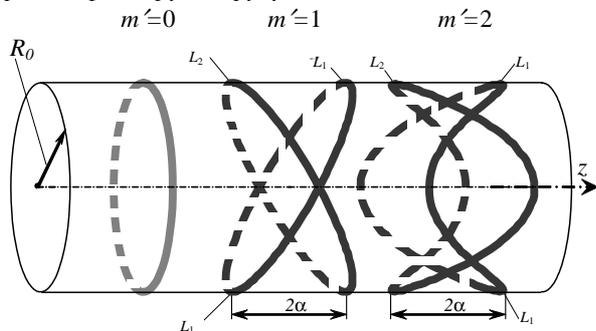


Рис. 1. Расположение селективирующих контуров на общей цилиндрической поверхности

Тогда косинусоидальный (верхняя часть фигурных скобок) и синусоидальный (нижняя часть фигурных скобок) контура порядка  $m'$  запишем для краткости в виде

$$L_1(\varphi) = -L_2(\varphi) = \alpha \begin{cases} \cos m'\varphi \\ \sin m'\varphi \end{cases}. \quad (7)$$

где  $\alpha$  - постоянный коэффициент, определяющий амплитуду отклонения вдоль цилиндра, выбираемый (в отличие от известных из [4]) одного порядка с его радиусом  $R_0$ . Тогда под  $d\vec{l}$  (3) следует понимать выражение:

$$\begin{aligned} d\vec{l} &= dl_{x_1} \cdot \vec{e}_{x_1} + dl_{x_2} \cdot \vec{e}_{x_2} = \\ &= \alpha \left( \frac{1}{h_1} \frac{\partial z}{\partial x_1} d[L_1(\varphi) - L_2(\varphi)] \right) \vec{e}_{x_1} + \\ &+ \alpha \left( \frac{1}{h_2} \frac{\partial z}{\partial x_2} d[L_1(\varphi) - L_2(\varphi)] \right) \vec{e}_{x_2} \end{aligned} \quad (8)$$

Магнитный поток  $\Phi^{m'}$ , сцепленный с контуром порядка  $m'$  согласно (3) запишется как

$$\Phi^{m'} = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{A}_{x_1} d\vec{l}_{x_1} + \oint \vec{A}_{x_2} d\vec{l}_{x_2} \quad (9)$$

и после упрощения выражения примет вид

$$\Phi^{m'} = \frac{-\alpha \mu_0 h_\varphi}{h_1 h_2} \left\{ \begin{aligned} &\frac{dz}{dx_1} \frac{\partial}{\partial x_2} U_n^{m'}(x_1, x_2) - \\ &-\frac{dz}{dx_2} \frac{\partial}{\partial x_1} U_n^{m'}(x_1, x_2) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Вид выражения (10) показывает практическую возможность селекции из магнитного потока тессеральных гармоник порядка  $m'$ , с помощью контура специальной конфигурации. При этом пространственная конфигурация контура определяет порядок выделяемых гармоник. Тем самым контур превращается в аппаратный фильтр селекции гармоник заданного порядка. Конструктивно такой контур близок к контуру для выделения зональных гармоник, что позволяет одновременное использование, как зонально-

го контура, так и достаточного количества предлагаемых контуров для практического определения необходимого количества тессеральных пространственных гармоник. Для этого необходимо расположить контура соосно, как показано на рис. 1, и учесть смещение между контурами при измерении потока. Преимущество использования таких контуров состоит в общности всей метрологической базы необходимой для практического определения коэффициентов как сферических, так и сфероидальных гармоник.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе теоретически обоснована пространственная конфигурация универсальных контуров измерительной системы, селективирующих сферические и сфероидальные гармоники заданного порядка. Создание таких систем необходимо для практического проведения пространственного гармонического анализа магнитного поля вблизи технических объектов инвариантно к особенностям их геометрии.

Преимущество такой контурной системы заключается в возможности определения достаточного количества гармоник, необходимого для проведения описания с заданной точностью магнитного поля технического объекта.

Принципиальным отличием геометрической конфигурации предлагаемых измерительных контуров является их более рациональное размещение на цилиндрической поверхности по сравнению с контурами измерительных устройств мультиполей [4], имеющих жесткое ограничение на протяженность вдоль цилиндра ( $\alpha < 0,1R_0$ ). Это существенно увеличивает полезную площадь контуров и как следствие улучшает соотношение измеренного сигнала к помехе.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Розов В.Ю. Системы автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля енергонасичених об'єктів: Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.09.03. / ІЕД НАНУ. - Київ, 2002. - 40 с.
- [2] Гетьман А.В. Особенности исследования магнитного поля технического объекта вблизи его поверхности // Техническая электродинамика. - 2006.- Тематический выпуск. Ч. 6. Проблеми сучасної електротехніки. -С.9-12.
- [3] Волохов С.А., Кильдишев А.В. Нормализованные магнитные сигнатуры мультипольного источника, движущегося по оси кругового контура // Электричество. - 1997. - №3. - С. 65-67.
- [4] Волохов С.А., Кильдишев А.В. Измерительные контуры и селективирующие функции для определения тессеральных мультиполей интегральным преобразованием магнитных сигнатур // Космічна наука і технологія. - 1996. - Т.2, №5-6. - С.26-30.
- [5] Гетьман А.В. Структура контурных динамических систем для практического гармонического анализа магнитного поля технических объектов // Техническая электродинамика. - 2008.- Тематический выпуск. Ч. 3. Проблеми сучасної електротехніки. -С. 97-100.
- [6] Ерофенко В.Т. Теоремы сложения. Справочник. - Минск: Наука и техника, 1962.-256 с

Поступила 05.09.08

## ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОРЕЗОНАНСНОЙ ЦЕПИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СХЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Канов Л.Н., к.т.н., доц.

Севастопольский национальный технический университет  
Украина, 99053, Севастополь, Стрелецкая бухта, СевНТУ,  
кафедра "Судовые и промышленные электромеханические системы"  
тел. (0692) 235-272

*Запропоновано схемні моделі основних лінійних і нелінійних електротехнічних елементів у стаціонарному режимі змінного струму, на підставі яких побудована схемна модель феррорезонансного кола. Запропоновано методику побудови вольтамперних і амплітудочастотних характеристик коли, а також визначення границь областей стійких режимів.*

*Предложены схемные модели основных линейных и нелинейных электротехнических элементов в стационарном режиме переменного тока, на основании которых получена схемная модель феррорезонансной цепи. Предложена методика построения вольтамперных и амплитудочастотных характеристик цепи и определения границ устойчивых режимов.*

### ВВЕДЕНИЕ

В электроприводах переменного тока, где применяются магнитные усилители и все чаще частотно регулируемые асинхронные двигатели, важное значение имеет анализ вольтамперных (ВАХ) и амплитудочастотных (АЧХ) характеристик феррорезонансных цепей [1]. Точное аналитическое исследование периодических режимов в таких цепях невозможно. Существует несколько методов приближенного аналитического определения параметров периодических режимов, постоянно появляются новые их модификации. Так в [2] на основе метода оптимальной линеаризации изложен итеративный подход к расчету установившихся режимов нелинейных цепей переменного тока, особенностью которого является возможность нахождения параметров нелинейных элементов по их ВАХ. В [3] предлагается метод последовательных приближений для анализа вынужденных колебаний в цепях, описываемых дифференциальными уравнениями высокого порядка. Для нахождения очередных приближений предлагается формировать системы нелинейных алгебраических уравнений, распадающихся на каждом шаге решения на отдельные подсистемы линейных уравнений второго порядка.

В ряду этих методов выделяется простой и экономный метод гармонической линеаризации [4, 5], который является основой частотного анализа нелинейных цепей. Этот метод предполагает близкую к синусоидальной форму токов и напряжений в цепи и позволяет использовать комплексные амплитуды. Существует несколько модификаций этого метода, позволяющих повысить его точность, например, [6]. Обзор этих методов показывает, что все они связаны с большим количеством аналитических преобразований и не позволяют получить явных выражений для характеристик феррорезонансных цепей. Графические методы построения таких характеристик громоздки и имеют невысокую точность.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является разработка методики применения схемного моделирования для построения ВАХ и АЧХ нелинейных цепей в рамках условий метода гармонической линеаризации, т.е. в предположении малого отличия форм токов и напряжений от синусоидальной. Схемное моделирование представляет эффективный численный метод исследования режимов переменного тока в нелинейных цепях [7].

### МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определим схемные модели основных элементов в режиме синусоидального тока. Для линейного комплексного сопротивления  $\underline{Z} = R + jX$  справедливо  $(R + jX)(I' + jI'') = U' + jU''$ , где  $R, X$  – активное и реактивное сопротивление;  $I', I'', U', U''$  – вещественные и мнимые части комплексных, действующих токов и напряжений. Отделяя вещественные и мнимые части, получаем  $RI' - XI'' = U'$ ;  $RI'' + XI' = U''$ . Этим уравнениям соответствует схемная модель в виде пары последовательных цепей, изображенная на рис. 1, на которой реактивное сопротивление входит коэффициентом управления в управляемые источники напряжения. Очевидно, в схемной модели резистора эти источники будут отсутствовать, а для реактивных элементов будет отсутствовать активное сопротивление. Аналогично строятся схемные модели проводимостей, взаимных индуктивностей [7] и др.

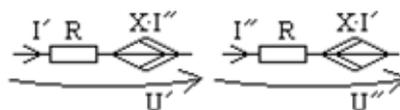


Рис. 1. Схемная модель комплексного сопротивления

Нелинейные элементы с однозначной ВАХ по действующим значениям токов и напряжений  $I = f(U)$  представляются парой нелинейных управляемых источников тока, соответствующих вещественным и мнимым частям тока в элементе. Эти ис-

точники зависят от вещественных и мнимых частей напряжения на них:  $I' = f_1(U', U'')$ ;  $I'' = f_2(U', U'')$ . Для конкретизации этих функций обратимся к записи активной и реактивной мощностей элемента:  $P = U'I' + U''I''$ ;  $Q = U''I' - U'I''$ . В резистивном нелинейном элементе

$$U''I' = U'I'', \quad (1)$$

в реактивном элементе

$$U'I' = -U''I''. \quad (2)$$

Запишем ВАХ нелинейного элемента в виде  $I^2 = f^2(U) = (I')^2 + (I'')^2$ . Тогда для резистивного элемента с учетом (1) получаем

$$I' = \pm \frac{U'}{U} f(U); I'' = \pm \frac{U''}{U} f(U); \quad (3)$$

для реактивного элемента с учетом (2)

$$I' = \pm \frac{U''}{U} f(U); I'' = \pm \frac{U'}{U} f(U). \quad (4)$$

Из выражения активной мощности следует для резистивного элемента  $U'I' > -U''I''$ . Подставляя сюда  $U'', U'$  из (1), получаем  $U'I' > -\frac{U'}{I'}(I'')^2$ ;  $\frac{U''}{I''}(I')^2 > -U''I''$ . Поэтому знаки  $U'$  и  $I'$ , а также  $U''$  и  $I''$  в выражениях (3) совпадают, и эти выражения принимают окончательный вид

$$I' = \frac{U'}{U} f(U); I'' = \frac{U''}{U} f(U).$$

Из выражения для реактивной мощности в индуктивном элементе  $U''I' > U'I''$ . Подставляя сюда  $U', U''$  из (2), получаем  $U''I' > -\frac{U''}{I'}(I'')^2$ ;  $-\frac{U'}{I''}(I')^2 > U'I''$ . Поэтому знаки  $U''$  и  $I'$  в выражениях (4) совпадают, а знаки  $U'$  и  $I''$  противоположны, и эти выражения принимают окончательный вид

$$I' = \frac{U''}{U} f(U); I'' = -\frac{U'}{U} f(U). \quad (5)$$

Для нелинейного емкостного элемента знаки в (5) будут противоположны. Аналогичное представление можно выполнить для нелинейных элементов с ВАХ вида  $U = f(I)$ .

С помощью полученных схемных моделей элементов строятся схемные модели цепей переменного тока, представляющие собой две цепи, объединенные управляемыми источниками. Расчет этих моделей дает вещественные и мнимые составляющие токов и напряжений в исследуемой цепи.

Рассмотрим построение характеристик последовательной феррорезонансной цепи с подмагничиванием. Примем для веберамперной характеристики индуктивности полиномиальную аппроксимацию  $F = a_1\Phi + a_3\Phi^3$ , где магнитодвижущая сила определяется как ток  $i$  рабочей обмотки  $w$ , так и ток  $I_y$  обмотки подмагничивания  $w_y$ :  $F = wi + w_y I_y$ .

Магнитный поток кроме основной гармоники содержит постоянную составляющую  $\Phi_0$ :

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_M \cos \omega t, \quad \Phi_M = \frac{U_M}{\omega w}, \quad (6)$$

где  $U_M$  – амплитуда напряжения на рабочей обмотке.

Выделим в выражении веберамперной характеристики слагаемые, соответствующие постоянным составляющим тока и потока

$$w_y I_y = \left( a_1 + 3a_3 \left( \frac{U}{\omega w} \right)^2 \right) \Phi_0 + a_3 \Phi_0^3 \quad (7)$$

и составляющим первой гармоники

$$wi = - \left( a_1 \frac{U_M}{\omega w} - 3\Phi_0^2 \frac{U_M}{\omega w} a_3 - \frac{3}{4} a_3 \left( \frac{U_M}{\omega w} \right)^3 \right) \cos \omega t.$$

Последнее выражение дает уравнение ВАХ нелинейной индуктивности по действующим значениям тока

$$\text{и напряжения } I = \frac{U}{\omega w^2} \left( a_1 + 3a_3 \Phi_0^2 + 1,5a_3 \left( \frac{U}{\omega w} \right)^2 \right),$$

в котором  $\Phi_0$  определяется из (7) и зависит от тока подмагничивания. В соответствии с этим выражения (5) для управляемых источников тока схемной модели индуктивности принимают вид

$$I' = \frac{U''}{\omega w^2} \left( a_1 + 3a_3 \Phi_0^2 + 1,5a_3 \left( \frac{U}{\omega w} \right)^2 \right); \quad (8)$$

$$I'' = -\frac{I'}{U'} U'; \quad U^2 = (U')^2 + (U'')^2.$$

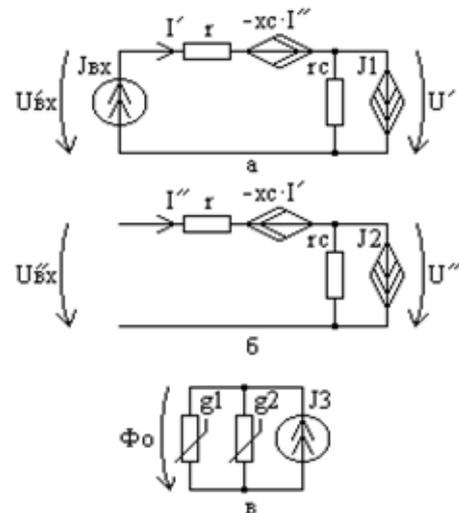


Рис. 2. Схемная модель последовательной феррорезонансной цепи

Схемная модель последовательной феррорезонансной цепи изображена на рис. 2, где в соответствии с (7) обозначены:  $g1 = a_1 + 3a_3 \left( \frac{U}{\omega w} \right)^2$  – управляемая проводимость,  $g2 = a_3 \Phi_0^2$  – нелинейная проводимость,  $J3 = w_y I_y$ ,  $r$  – сопротивление рабочей обмотки, управляемые источники напряжения представля-

ют емкость, а сопротивление  $r_c$  имитирует потери на гистерезис и принимается постоянным [8]. Управляемые источники тока  $J_1, J_2$  определяются в соответствии с (8). Напряжение на проводимости  $g_1$  численно соответствует постоянной составляющей магнитного потока.

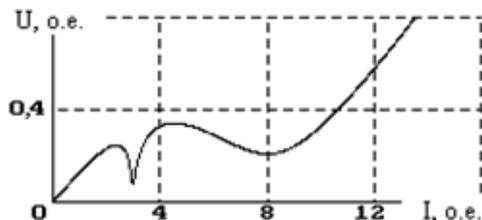


Рис. 3. Вольтамперная характеристика последовательной феррорезонансной цепи

На рис. 3 изображена ВАХ цепи, полученная просчетом схемной модели при изменении величины  $J_{BX}$ . Входное напряжение подсчитывается по выражению  $U_{BX} = \sqrt{(U'_{BX})^2 + (U''_{BX})^2}$ . Параметры цепи в относительных единицах:  $r = 0,025$ ;  $\omega w = 1$ ;  $x_c = 0,22$ ;  $r_c = 100$ ;  $a_1 = 0,5$ ;  $a_3 = 1$ ;  $w_y I_y = 1$ . Провал напряжения при  $I = 8$  возникает из-за насыщения индуктивности при больших токах, второй провал при  $I = 3$  объясняется искривлением ВАХ индуктивности вследствие подмагничивания. При плавном изменении входного напряжения в цепи возникает двойной триггерный эффект.

Для построения АЧХ в схемной модели на рис. 2,а источник тока  $J_{BX}$  следует заменить единичным источником напряжения, а на рис. 2,б контакты с левой стороны схемы закоротить. На рис. 4 изображена АЧХ цепи, построенная просчетом измененной таким образом схемной модели при изменении частоты. Наклон резонансной кривой вправо (участок 2 – 4) при высоких токах объясняется повышением резонансной частоты с падением индуктивности, а наклон влево (участок 1 – 2) при небольших токах возникает при некотором возрастании индуктивности вследствие подмагничивания.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки устойчивости режима цепи обратимся к уравнению

$$u_L + ri(\Phi, I_y) + \frac{1}{C} \int i(\Phi, I_y) dt = U_M \sin \omega t,$$

где  $i(\Phi, I_y)$  – нелинейная зависимость между мгновенными значениями токов и магнитного потока. После дифференцирования получаем

$$\frac{du_L}{dt} = f(\Phi, I_y) + \omega U_M \cos \omega t, \quad (9)$$

где  $f(\Phi, I_y) = -r \frac{\partial i}{\partial \Phi} \frac{d\Phi}{dt} - \frac{1}{C} i(\Phi, I_y)$ . Перепишем далее выражение (6) в более общем виде:

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_M(t) \cos x; \quad x = \omega t + \varphi(t),$$

где  $\Phi_M(t), \varphi(t)$  – медленно меняющиеся амплитуда первой гармоники потока и его начальная фаза.

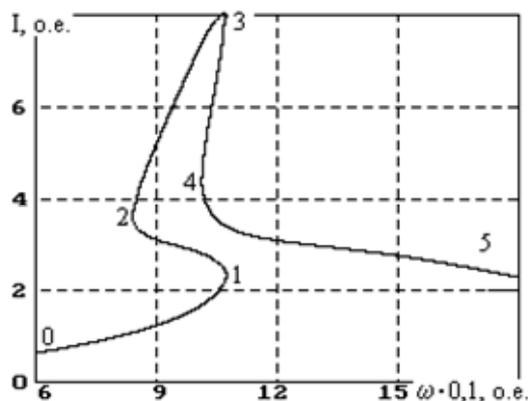


Рис. 4. Амплитудочастотная характеристика последовательной феррорезонансной цепи

Дифференцируя последнее выражение по "короткому времени", как это принято в методе медленно меняющихся амплитуд [4, 5, 8], получаем  $\frac{d\Phi}{dt} = -\omega \Phi_M \sin x$ . Дифференцирование же по "длинному времени" дает

$$\frac{d\Phi_M}{dt} \cos x - \Phi_M(t) \left( \omega + \frac{d\varphi}{dt} \right) \sin x = -\omega \Phi_M \sin x. \quad (10)$$

С учетом равенства  $u_L(t) = w \frac{d\Phi(t)}{dt}$  и соотношения

(10) уравнение (9) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_M}{dt} \sin x + \Phi_M \cdot \left( \omega + \frac{d\varphi}{dt} \right) \cos x - \frac{1}{\omega w} f(\Phi, I_y) = \\ = -\frac{U_M}{w} \cos \omega t. \quad (11) \end{aligned}$$

Уравнения (10), (11) представляют уравнения для медленно меняющихся амплитуды магнитного потока  $\Phi_M(t)$  и начальной фазы  $\varphi(t)$ . После приведения этих уравнений к нормальному виду и усреднения за период по  $x$ , получаем укороченные уравнения, правые части которых не зависят явно от времени:

$$\frac{d\Phi_M(t)}{dt} = F_1(\Phi_M, \varphi); \quad \frac{d\varphi(t)}{dt} = F_2(\Phi_M, \varphi). \quad (12)$$

Необходимое условие устойчивости стационарного режима состоит в выполнении неравенств

$$-(a_{11} + a_{22}) > 0; \quad a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} > 0,$$

где  $a_{11} = \frac{\partial F_1}{\partial \Phi_M}$ ;  $a_{12} = \frac{\partial F_1}{\partial \varphi}$ ;  $a_{21} = \frac{\partial F_2}{\partial \Phi_M}$ ;  $a_{22} = \frac{\partial F_2}{\partial \varphi}$ .

Непосредственная проверка этих условий для исследуемой цепи достаточно громоздка, однако для второго условия непосредственно по виду АЧХ можно определить граничные по устойчивости точки, в которых  $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0$ .

Для этого отметим, что условия стационарного режима укороченных уравнений имеют вид:  $F_1(\Phi_M, \varphi) = 0$ ;  $F_2(\Phi_M, \varphi) = 0$ . Последнее равенство задает неявную функцию  $\varphi = \varphi(\Phi_M)$ ; тогда для ста-

ционарного режима получаем уравнение относительно одной переменной

$$F_1(\Phi_M, \varphi(\Phi_M)) = 0. \quad (13)$$

Согласно правилам дифференцирования неявной

функции получаем  $\frac{dF_1}{d\Phi_M} = \frac{\partial F_1}{\partial \Phi_M} - \frac{\partial F_1}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \Phi_M}$ . Следова-

тельно, граничное условие состоит в равенстве  $\frac{dF_1}{d\Phi_M} = 0$ . Поэтому для выявления граничных точек

на АЧХ, которая является графическим представлением уравнения (13), нужно найти точки касания АЧХ с вертикальными прямыми, так как при заданном токе управления амплитуды рабочего тока и потока связаны однозначно.

В соответствии с выполненным анализом на рис.4 выделим граничные точки 1 – 4, отделяющие устойчивые и неустойчивые режимы. Из физических соображений можно заключить, что режимы на участках 0 – 1 и 4 – 5 устойчивы. Тогда участкам 1 – 2 и 3 – 4 соответствуют неустойчивые режимы. К устойчивым можно отнести участок 2 – 3. В соответствии с этим в цепи возможны множественные триггерные эффекты при плавном изменении частоты.

При плавном увеличении частоты с точки 1 происходит скачок тока вверх на участок 2 – 3; при дальнейшем увеличении частоты с точки 3 на вершине кривой происходит скачок тока вниз на участок 4 – 5. При плавном уменьшении частоты с точки 4 происходит скачок тока вверх на участок 2 – 3; при дальнейшем уменьшении частоты происходит скачок тока вниз на участок 0 – 1. Кроме того, при увеличении частоты с точки 1 скачок тока может происходить сразу на участок 4 – 5, минуя вершину графика. Поэтому неустойчивые участки не могут быть достигнуты при изменении частоты.

## ВЫВОДЫ

Предложены схемные модели основных линейных и нелинейных электротехнических элементов в стационарном режиме переменного тока в условиях метода гармонической линеаризации. Построена схемная модель последовательной феррорезонансной цепи, состоящая из сопротивлений, линейных, нелинейных, управляемых и независимых источников напряжения и тока.

Предложена методика построения вольтамперных и амплитудочастотных характеристик феррорезонансных цепей с помощью полученных схемных моделей, основанная на просчете режима при изменении входного тока и частоты.

Обосновано применение метода медленно меняющихся синусоид для выявления граничных точек на АЧХ, отделяющих участки, соответствующие устойчивым и неустойчивым режимам феррорезонансной цепи. Граничные точки являются точками касания вертикальных прямых и графика амплитудочастотной характеристики.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Изд. центр "Академия", 2006. – 272 с.
- [2] Калугин Е.Н. Метод оптимальной линеаризации для расчета установившихся режимов нелинейной электрической цепи // Электричество. – 1989. – № 10. – С. 53-60.
- [3] Орешников В.Г. Метод анализа вынужденных колебаний в нелинейных цепях // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1997. – № 6. – С. 9-11.
- [4] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Изд-во "Гардарика", 2006. – 701 с.
- [5] Данилов Л.В. Теория нелинейных электрических цепей / Л.В.Данилов, П.Н.Матханов, Е.С.Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
- [6] Бирюк Н.Д. Анализ колебаний в нелинейном контуре методом комплексных амплитуд / Н.Д.Бирюк, В.Н.Дальчев // Электричество. – 1988. – № 8. – С. 46-51.
- [7] Канов Л.Н. Схемное моделирование нелинейных электрических цепей переменного тока // Вестник СевГТУ. Вып. 41. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. Севастоп. нац. техн. ун-т. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. – С. 151-154.
- [8] Филиппов Е. Нелинейная электротехника. – М.: Энергия, 1976. – 496 с.

Поступила 30.05.2008

## ШАРОВАЯ МОЛНИЯ – МОЩНЫЙ ПРИРОДНЫЙ МОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА. НОВАЯ ГИПОТЕЗА ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ФЕНОМЕНА

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

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: eft@kpi.kharkov.ua

*Запропоновано нову фізико-математичну модель і нову гіпотезу ймовірного походження, утворення й існування в повітряній атмосфері такого природного феномена як кульова блискавка (КБ), що базуються на електричних диполях мікрочастинок (молекул) води і їхній електростатичній взаємодії з негативно зарядженим ядром блискавки. Виконані розрахункові оцінки можливих рівнів напруженості надсильного електричного поля усередині і поза активній сферичній області КБ, а також електричних потенціалів, щільності електричної енергії і абсолютних показників електричної енергії, що запасасться КБ.*

*Предложена новая физико-математическая модель и новая гипотеза вероятного происхождения, образования и существования в воздушной атмосфере такого природного феномена как шаровая молния (ШМ), базирующиеся на электрических диполях микрочастиц (молекул) воды и их электростатическом взаимодействии с отрицательно заряженным ядром молнии. Выполнены расчетные оценки возможных уровней напряженности сверхсильного электрического поля внутри и вне активной сферической области ШМ, а также электрических потенциалов, плотностей и абсолютных показателей электрической энергии, запасаемой ШМ.*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во всем мире вопросам изучения таких природных электрофизических феноменов как линейная молния (ЛМ) и шаровая молния (ШМ) уделяется повышенное внимание со стороны не только научно-технических специалистов (электрофизиков, метеорологов, электроэнергетиков), но и бизнесменов-практиков, стремящихся для дальнейшего отечественного научно-технического прогресса и своего финансового роста инвестировать денежные средства в новые высокие электротехнологии, открывающие новые энергоресурсные горизонты и производственные возможности для человечества [1-3]. Несмотря на многочисленный ряд разработок гипотетического характера явления ШМ [1], регулярно наблюдаемой в земной атмосфере (особенно в период фронтальных гроз или ЛМ в воздушной атмосфере), оно изучено как в экспериментальном, так и в теоретическом плане крайне слабо. Начнем с того, что существующие теоретические модели ШМ не могут назвать и научно объяснить причины, приводящие к ее образованию. Эти модели не раскрывают возможные физические механизмы формирования подобного природного электрофизического явления. Они не в состоянии обосновать ее внешний вид, внутреннюю структуру, перемещение в воздушной атмосфере и внутри технических сооружений, притяжение к проводящим предметам и металлоконструкциям, существенный нагрев ею токопроводящих тел, возникающие при появлении ШМ световые эффекты, звуковые колебания (шипение и потрескивание) и сопровождающие ее протекание характерные запахи (озона, горящей серы). Они не могут объяснить кратковременность ее существования в атмосфере (от секунд до минут) и дать оценки энергетическим характеристикам этого явления.

Все известные на сегодня теории ШМ подразделяются на два больших класса [1, 2]: *первый* – осно-

ванный на том, что источник энергии этого явления находится внутри ШМ (молния с внутренним источником энергии); *второй* – базируется на том, что источник энергии этого природного феномена находится вне ШМ (молния с внешним источником энергии). Первый класс признанных научной общественностью теоретических моделей ШМ содержит шесть основных подклассов, построенных на: а) локальном горении в воздушной атмосфере газов с необычными свойствами; б) локальном горении воздуха атмосферного давления; в) плазме высокой плотности; г) замкнутых кольцевых токах, нагревающих воздух; д) воздушных вихрях со светящимися газами; ж) собственном электромагнитном поле микроволнового излучения. Второй класс известных теоретических моделей ШМ содержит три основных подкласса, построенных на: з) внешнем высокочастотном электромагнитном поле; и) протекании через локальный сферический объем молнии внешней постоянной составляющей тока ЛМ, направленной от грозового облака к земле; к) внешних сфокусированных космических излучениях (частицах). В бывшем СССР определенное развитие получила теория ШМ, основанная на сфокусированном высокочастотном электромагнитном поле от грозового облака, создающем и поддерживающем природную ШМ (подкласс "з", автор разработки – советский академик и выдающийся физик XX столетия Капица П.Л. [4, 5]). Добавим к этому то, что как раньше, так и сейчас в атмосферных облаках исследователями грозных разрядов не были обнаружены ни электрические, ни магнитные поля такой высокой интенсивности и частоты, которые были бы способны за счет своего излучения вызывать и поддерживать вдали от этих облаков рассматриваемое нами высокоэнергетическое электрофизическое явление, именуемое в физике атмосферного электричества как ШМ.

Своей загадочностью, таинственностью и физи-

ческим величием феномен ШМ притягивает и манит вот уже многие годы и даже не одно столетие пытливые человеческие умы к своему изучению, своей разгадке и возможному практическому применению в прямой (например, для аккумуляирования и дальнейшего технологического использования атмосферного электричества) или косвенной (например, для использования в технике высоких плотностей энергии и практической электротехнике физических механизмов образования, протекания и сравнительно длительного самоподдержания в атмосферном воздухе высокоэнергетического явления ШМ) форме.

Целью данной статьи является разработка новой приближенной физико-математической модели ШМ и расчетная оценка на ее основе возможных силовых электрических и энергетических характеристик исследуемого вида молнии, а также описание новой гипотезы вероятного происхождения, образования и существования в воздушной земной атмосфере такого природного электрофизического явления как ШМ.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОТЕКАНИЯ В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ ШМ

Рассмотрим некоторую локальную область воздушной атмосферы, содержащую взвешенные в воздухе при нормальных условиях (температура среды равна  $T_0=0$  °C; давление воздушной среды составляет  $p_0=101,325$  кПа [6]) мелкодисперсные частицы воды и для которой характерно активное влияние электрофизических процессов, сопровождающих ЛМ (например, протекание больших импульсных токов, образование сильноточных плазменных каналов, возникновение сильных электрических и магнитных полей), протекающую вблизи исследуемой области. Пусть присутствующие в рассматриваемой области микрочастицы и молекулы воды имеют геометрическую форму, близкую к сферам, и являются изотропным полярным диэлектриком, молекулы которого имеют связанные электроны, расположенные несимметрично относительно своих атомных ядер [1, 6]. Предполагаем, что в результате теплового движения в воздушной атмосфере молекул воды векторы их собственных дипольных электрических моментов до воздействия на нее (атмосферу) ЛМ ориентированы хаотично. Поэтому можно принять, что в невозбужденной воздушной атмосфере суммарный вектор дипольных электрических моментов молекул воды, содержащихся в любом микроскопическом (макроскопическом) атмосферном объеме влаги, будет равен нулю. Считаем, что воздействие внешнего электрического поля с напряженностью  $E_B$  (например, от ЛМ или от ее оставшихся в атмосфере зарядных электрических образований) приводит к дополнительной электронной и ориентационной поляризации полярных диэлектрических микросфер воды [6, 7]. Известно, что данная электрическая поляризация для такого полярного диэлектрика как вода связана с возникновением в ее молекулах индуцированного электрического дипольного момента  $p_e$ , обусловленного дополнитель-

ным пространственным смещением их сравнительно легких отрицательно заряженных электронных облаков относительно сравнительно тяжелых положительно заряженных ядер [7]. Полагаем, что после указанной поляризации во внешнем электрическом поле с напряженностью  $E_B$  диэлектрические микросферы воды принимают более продолговатую геометрическую форму, похожую на вытянутые сфероиды [6, 8]. На основании законов поляризации диэлектриков допускаем, что торцы этих изотропных вытянутых сфероидов микрочастиц воды, состоящих из полярных молекул влаги, на своих поверхностях содержат поляризационные некомпенсированные связанные электрические заряды противоположной полярности с поверхностной плотностью  $\sigma_e$ . Причем, на торцевых поверхностях вытянутых сфероидов микродиполей воды (с наименьшим радиусом торцов около  $r_m$ ), в которые входят силовые линии и векторы напряженности  $E_B$  возникают отрицательные заряды (избыток электронов), а на их противоположных поверхностях – положительные заряды (недостаток электронов).

Принимаем то допущение, что в указанных выше активных электромагнитных и метеорологических условиях в воздушной атмосфере за счет действия в ней ЛМ возможно локальное формирование высококонцентрированного макроскопического электронного сфероподобного образования (электронного сгустка или ядра молнии радиусом  $r_e$ ), вокруг которого, в свою очередь, возможна объемная концентрация взвешенных в воздухе указанных выше электрических микродиполей влаги, образующих внешнюю оболочку молнии. Полагаем, что при данной локальной концентрации электродиполей – вытянутых сфероидов воды вокруг принятого центрального электронного "зародыша" или ядра молнии расстояние  $r_{em}$  между торцами диполей микрочастиц влаги, а также между диполями и ядром ШМ составляет порядка габаритных размеров молекулы воды (рис.).

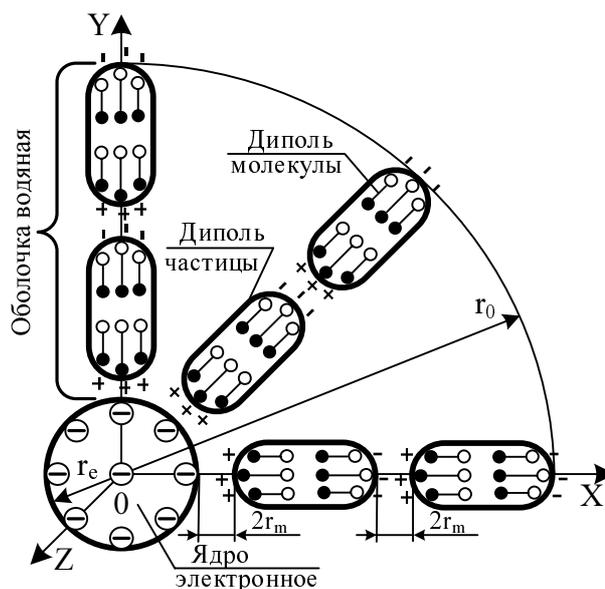


Рис. Радиальная структура молнии и основные электрофизические элементы в предложенной модели ШМ

В пользу такого допущения качественно говорит тот факт, что при электрической поляризации полярного диэлектрика (в нашем случае воды) величина пространственного смещения зарядов его молекул оказывается равной примерно диаметру молекул вещества. Именно при таком допущении формируемое из электрических микродиполей воды внешнее образование ШМ (ее дипольная оболочка) будет практически однородной по радиусу электрической структурой. А значит, такая внутренняя структура оболочки ШМ будет более отвечать электрическим условиям ее относительной устойчивости и долговечности. Требуется с учетом принятых положений и допущений разработать новую более уточненную и отвечающую реальным электрофизическим условиям в воздушной атмосфере Земли физико-математическую модель ШМ и на ее базе выполнить расчетные оценки возможных уровней электрических полей, плотностей и абсолютных показателей электрической энергии, которые могут образовываться и запасаться в ШМ.

## 2. ОБЩИЕ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕЛИ ШМ

Считаем, что согласно предлагаемой модели исследуемого вида молнии и в соответствии с рис. образующаяся в воздушной земной атмосфере ШМ характеризуется следующими вероятными основными электрофизическими и геометрическими признаками:

1. Наличием центрального высококонцентрированного отрицательно заряженного неподвижного сплошного электронного ядра молнии сферической формы с макроскопическим радиусом  $r_e$ .

2. Наличием вокруг ядра молнии внешней сферической оболочки ШМ наружным макроскопическим радиусом  $r_0$ , состоящей из множества радиально расположенных неподвижных электрических диполей микрочастиц воды, состоящих из поляризованных полярных молекул и размещенных по радиусу на расстоянии  $r_{em}$  друг от друга и от ядра молнии.

3. В оболочке ШМ междипольное расстояние  $r_{em}$  равно диаметру  $2r_m$  сферы полярной молекулы воды до воздействия на нее внешнего электрического поля с напряженностью  $E_B$ , а продольный размер электрического диполя микрочастицы воды не менее, чем на порядок больше продольного размера ее молекулярного диполя.

4. Образованием внутреннего и внешнего электростатических электрических полей, первое из которых локализуется между ядром молнии и первым слоем электрических диполей микрочастиц воды, а также между указанными диполями микрочастиц и молекул, а второе возникает вне сферической оболочки ШМ.

5. Электродиполи молекул воды с поляризационными некомпенсированными зарядами на своих краях характеризуются электрическими потенциалами  $\varphi_{e+}$  и  $\varphi_{e-}$  и образуют своими краями эквипотенциальные сфероподобные краевые поверхности диполей микрочастиц воды с указанными потенциалами.

6. Наименьший радиус краев электрических диполей – вытянутых сфероидов микрочастиц воды, на которых сконцентрированы их поверхностные поля-

ризационные некомпенсированные связанные заряды с поверхностной плотностью  $\sigma_e$ , равен примерно радиусу  $r_m$  сферы полярной молекулы воды.

7. Поверхностная плотность  $\sigma_e$  поляризационных некомпенсированных зарядов диполей микрочастиц воды приблизительно равна поверхностной плотности  $\sigma_m$  поляризационных зарядов для диполей полярных молекул воды, характеризующихся в объеме микрочастиц влаги своей концентрацией (объемной плотностью), равной  $n_0$  ( $m^{-3}$ ) [6].

## 3. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ В ШМ

В соответствии с принятыми положениями, допущениями, структурными элементами ШМ и законами электростатики для электрической системы «микродиполь воды – микродиполь воды» внешней оболочки исследуемого вида молнии с поверхностными поляризационными связанными зарядами противоположной полярности плотностью  $\sigma_e = \sigma_m$  и электрическими потенциалами краев микродиполей воды, равными  $\varphi_{e+}$  и  $\varphi_{e-}$ , можно записать следующее приближенное выражение [9, 10]:

$$\frac{10e_0}{(\varphi_{e+} - \varphi_{e-})} = \frac{\pi\epsilon_0 r_m}{(1 - r_m \cdot r_{ee}^{-1})}, \quad (1)$$

где  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – электрический заряд электрона;  $r_{ee} = 4r_m$  – эквивалентное расстояние между условными центрами противоположно заряженных краевых полусфер микродиполей воды;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

В левой части (1) для микродиполей воды присутствует электрический заряд  $q_m = 10e_0$ , обусловленный суммарным количеством связанных электронов в молекулярном электродиполе воды и соответственно в молекуле воды (восемь электронов от атома кислорода и два от двух атомов водорода) [7]. Пространственное дополнительное смещение во внешнем электрическом поле именно этого количества электронов в полярной молекуле воды относительно ее положительно заряженных ядер атомов кислорода и водорода и обуславливает ее, а также микродиполей воды дополнительную электрическую поляризацию.

С учетом того, что модули  $|\varphi_{e+}|$  и  $|\varphi_{e-}|$  электрических потенциалов рассматриваемых микродиполей воды равны друг другу, то из (1) для модулей электрических потенциалов краев электрических микродиполей и молекулярных диполей воды в ШМ в принятом приближении получаем:

$$|\varphi_{e+}| = |\varphi_{e-}| = \frac{15e_0}{4\pi\epsilon_0 r_m}. \quad (2)$$

Численная оценка радиуса  $r_m$  сферы полярной молекулы воды, входящего в формулу (2), при плотности воды в  $1000 \text{ кг/м}^3$  [7], молярной массе воды  $M_m = 18 \cdot 10^{-3}$  кг [7], количестве молекул воды в ее одном моле –  $6,022 \cdot 10^{23}$ , равном постоянной Авогадро [7], и соответственно массе одной молекулы воды приблизительно в  $2,99 \cdot 10^{-26}$  кг показывает, что вели-

чина  $r_m$  составляет примерно  $1,925 \cdot 10^{-10}$  м. Тогда согласно принятой расчетной модели ШМ и в соответствии с (2) уровень электрического потенциала во внешней оболочке ШМ может составлять около  $\pm 112$  В. Этот уровень  $\Phi_{e+}$  и  $\Phi_{e-}$  при принятой геометрии электрических микродиполей воды, ядра и внешней оболочки молнии будет наибольшим для ШМ.

#### 4. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ШМ

**Расчет электрического поля внутри ШМ.** Принимая во внимание принятую структуру и геометрию составных элементов ШМ, для напряженности  $E_{ОВ}$  электростатического электрического поля между микродиполями воды, входящими в оболочку молнии, следует следующее приближенное соотношение:

$$E_{ОВ} = \frac{(\Phi_{e+} - \Phi_{e-})}{2r_m}. \quad (3)$$

При равенстве электрических потенциалов двух смежных микродиполей воды со связанными поляризационными зарядами противоположной полярности, разделенных вакуумным зазором молекулярной толщины  $2r_m$ , с учетом (2) из (3) для  $E_{ОВ}$  получаем:

$$E_{ОВ} = \frac{15e_0}{4\pi\epsilon_0 r_m^2}. \quad (4)$$

В результате из (4) при  $r_m = 1,925 \cdot 10^{-10}$  м следует, что уровень напряженности электрического поля в изоляционных (вакуумных) зазорах внешней оболочки ШМ, содержащей электрические микродиполи воды, может составлять численное значение, равное примерно  $5,831 \cdot 10^{11}$  В/м. Сравнение полученного уровня напряженности электростатического сверхсильного электрического поля в микродипольной оболочке ШМ с известными на сегодня количественными показателями для сверхсильных электрических полей в области атомной и ядерной физики свидетельствует о том, что согласно современным данным, приведенным в [7, 11], уровни напряженности электрического поля в атомах вещества, создаваемого электрическими зарядами ядер и электронных атомных сферических оболочек, составляют не менее  $10^{10}$  В/м. Видно, что полученные здесь данные для  $E_{ОВ}$  не противоречат фундаментальным физическим данным современной науки и здравому физическому смыслу.

**Расчет электрического поля снаружи ШМ.** Можно показать, что в воздушной атмосфере снаружи рассматриваемой модели ШМ вблизи ее наружного сферического слоя из отдельных электрических микродиполей воды для напряженности  $E_{ОН}$  электростатического электрического поля в соответствии с фундаментальной теоремой Остроградского-Гаусса [6] будет справедлива следующая расчетная формула:

$$E_{ОН} = \frac{\sigma_e}{\epsilon_0}. \quad (5)$$

В приближении того, что поверхностная плотность  $\sigma_e$  поляризационных некомпенсированных зарядов микродиполей воды равна поверхностной

плотности  $\sigma_m$  связанных зарядов величиной  $q_m = 10e_0$  на элементарных диполях полярных молекул воды, обусловленных дополнительной поляризацией этих молекул во внешнем электрическом поле с напряженностью  $E_B$ , а также того, что поверхность полусфер диполей полярных молекул воды с этими связанными зарядами противоположной полярности равна  $S_m = 2\pi r_m^2$ , для величины  $\sigma_e$  примерно имеем:

$$\sigma_e = \frac{5e_0}{\pi r_m^2}. \quad (6)$$

Тогда с учетом (6) из (5) получаем следующее приближенное расчетное соотношение для напряженности электрического поля снаружи ШМ вблизи ее сферической микродипольной водяной оболочки:

$$E_{ОН} = \frac{5e_0}{\pi\epsilon_0 r_m^2}. \quad (7)$$

Численная оценка уровня  $E_{ОН}$  по (7) показывает, что при  $r_m = 1,925 \cdot 10^{-10}$  м снаружи ШМ вблизи ее микродиполей воды можно ожидать действие электростатического сверхсильного электрического поля с напряженностью, примерно равной  $E_{ОН} = 7,774 \cdot 10^{11}$  В/м. Как видим, уровень напряженности  $E_{ОН}$  электрического поля снаружи оболочки ШМ по (7) незначительно отличается от уровня напряженности  $E_{ОВ}$  электрического поля между микродиполями воды внутри оболочки ШМ, оцененного нами выше по (4). Такое согласие полевых характеристик  $E_{ОВ}$  и  $E_{ОН}$  может указывать на правомерность выбранной геометрии составных частей ШМ и используемых для ее исследования физических подходов.

#### 5. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ШМ

Теория электромагнитного поля и полученное нами для ШМ полевое соотношение (4) позволяют оценить уровень плотности  $w_0$  электрической энергии, запасаемой в слоистой микродипольной оболочке рассматриваемого вида молнии, в следующем приближенном виде:

$$w_0 = \frac{\epsilon_0 E_{ОВ}^2}{2} = \frac{7e_0^2}{\pi^2 \epsilon_0 r_m^4}. \quad (8)$$

Из (8) при  $r_m = 1,925 \cdot 10^{-10}$  м следует, что уровень плотности  $w_0$  электрической энергии, сосредоточенной в межмикродипольном воздушном (вакуумном) зазоре внешней поляризованной водяной оболочки ШМ достигает численной величины, равной примерно  $1,498 \cdot 10^{12}$  Дж/м<sup>3</sup>. Для сравнения этой величины с известными в электрофизике больших токов, высоких напряжений, плотностей токов и температур удельными показателями энергии в твердых телах отметим, что удельная энергия сублимации  $w_C$  меди, равная количеству теплоты для перевода единицы объема твердого материала медного проводника в металлический пар, состоящий из нейтральных атомов, принимает численное значение примерно  $4,68 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>

[12], а удельная энергия теплового разрушения  $w_D$  меди при импульсном воздействии на нее мощного лазерного излучения составляет около  $3,62 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> [13]. Кроме того, в атоме водорода (этом простейшем атоме вещества) согласно расчетным оценкам, представленным в [11], плотность энергии сверхсильного электрического поля достигает значений порядка  $10^{21}$  Дж/м<sup>3</sup>. Поэтому указанный выше оценочный уровень такого энергетического показателя как  $w_0$  для ШМ представляется вполне возможным.

## 6. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАПАСАЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ШМ

Запасаемая в междипольных сферических слоях оболочки ШМ электрическая энергия  $W_0$  молнии при принятом изоляционном межслойном радиальном зазоре величиной  $2r_m$  и оцененном нами уровне  $w_0$  определяется габаритными размерами электронного ядра (его радиусом  $r_e$ ) и внешней поляризованной водяной оболочки из микродиполей влаги (ее радиусом  $r_0$ ). Чем больше радиальная толщина ( $r_0 - r_e$ ) оболочки ШМ и тем больше в ней фактически молекулярных концентрических расположенных сферических природных конденсаторов на напряжение порядка 200 В (этот уровень напряжения следует из результатов раздела 3), тем больше и значения  $W_0$  для запасенной в ШМ электрической энергии между ее диполями микрочастиц. Можно считать, что с учетом используемых допущений в микродипольной водяной оболочке молнии (этом молекулярном многослойном сферическом электрическом накопителе атмосферного электричества) энергетически активная зона молнии ориентировочно занимает 1/1000 часть объема оболочки ШМ (из-за десятикратного превосходства радиальных размеров диполей микрочастиц воды над линейными размерами молекулярных диполей воды). При таком подходе рабочий активный сферический объем  $V_{OP}$  природного молекулярного накопителя электрической энергии, образованного только диполями микрочастиц воды, в ШМ может составить:

$$V_{OP} = \frac{\pi(r_0^3 - r_e^3)}{750}. \quad (9)$$

В результате с учетом (8) и (9) для уровня запасаемой в ШМ межмикродипольной электрической энергии  $W_0$  можно записать такое приближенное соотношение:

$$W_0 = \frac{7e_0^2(r_0^3 - r_e^3)}{750\pi\epsilon_0 r_m^4}. \quad (10)$$

При исходных оценочных геометрических параметрах для ШМ, примерно равных  $r_0 = 0,05$  м,  $r_e = 0,01$  м и  $r_m = 1,925 \cdot 10^{-10}$  м, из (10) для количественного показателя запасаемой в межмикродипольных слоях оболочки исследуемой молнии электрической энергии находим, что для выбранного нами случая величина  $W_0$  принимает численное значение около  $7,8 \cdot 10^5$  Дж, то есть порядка 1 МДж. Надо заметить, что при такой оценке электрической энергии, запасаемой в

ШМ, не учтены ее запасы, сосредоточенные между электрическими молекулярными диполями воды.

## 7. ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ, РАДИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И УСТОЙЧИВОСТИ ШМ С ПОЗИЦИИ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕЛИ

Отметим, что на основе предложенной здесь модели ШМ качественно описывается и геометрическая форма рассматриваемого природного феномена. Для обеспечения относительной электрической устойчивости ШМ, содержащей отрицательно заряженное сплошное ядро (сгусток электронов) и электронейтральную оболочку, необходима именно сферическая форма для этого электрофизического образования. Она необходима и для образования в воздушной атмосфере относительно долгоживущего сообщества связанных из-за поляризации положительных и отрицательных электрических зарядов рассматриваемых электрических микродиполей и молекулярных диполей оболочки ШМ: ведь только электронейтральность материи в макрообъемах обеспечивает ей надежное и устойчивое существование. Проявление одновременного электростатического притяжения и отталкивания поляризованных микроскопических и молекулярных диполей влаги в трехмерной сферической системе координат обеспечивает их взаимное относительно долгое сосуществование. Именно такая объемная макроэлектронейтральность дипольной оболочки ШМ и достигается при сфероподобной геометрической форме активной зоны в ШМ. Нарушение симметрии в оболочке ШМ и соответственно ее макроэлектронейтральности, а также возможные нарушения в балансе электрических зарядов электронного ядра ШМ незамедлительно приводит к электрическому распаду этого относительно устойчивого электрофизического образования из центрального отрицательно заряженного электронного ядра и периферийных электронейтральных диполей микрочастиц (молекул) воды и к дальнейшему выделению в воздушной области ее локализации запасенной электрической энергии  $W_0$  в междипольных (межмолекулярных) воздушных (вакуумных) радиальных слоях атомарно-молекулярной толщины оболочки ШМ, на краях которых размещены противоположно заряженные концы электрических микродиполей воды с поверхностными поляризационными связанными зарядами плотностью  $\sigma_e$ .

По-видимому, главной причиной недолговечности ШМ является ее немакроэлектронейтральность: наличие высококонцентрированного центрального отрицательно заряженного ядра (наиболее вероятно электронного сгустка геометрической формы, близкой к сферической) и макроэлектронейтральной оболочки из поляризованных микрочастиц (молекул) воды. С другой стороны, именно наличие высококонцентрированного заряженного ядра из электронов (центрального "зародыша" молнии) и является одной из главных причин образования самой ШМ. Без этого высококонцентрированного электронного ядра (электрического "зародыша" отрицательной полярности), по-моему, мнению, невозможно собрать и электрически удержать в локальной зоне огромное количество поляризованных микрочастиц и молекул воды. С учетом изложенного выше можно заключить, что время

существования ШМ (время ее "жизни") определяется как периодом сохранения макроэлектронейтральности ее сферической оболочки из электрических микродиполей воды, так и временем сохранения отрицательно заряженным ядром (высококонцентрированным электронным сгустком) своей немакроэлектронейтральности. Массовый отвод электрических зарядов одной полярности из сферического объема ШМ вне него (например, от сплошного электронного ядра на землю через заземленные металлические конструкции) и резкое ослабление уровня внешнего радиального электрического поля ядра молнии с напряженностью  $E_{я}$  может приводить к деполяризации близлежащих к ядру микрочастиц и молекул воды и к электрической асимметрии в оболочке рассматриваемого электрофизического образования, к ее (оболочки) разрушению и радиальному разлету входивших в ее состав электронейтральных микрочастиц (молекул) воды, а также к потере из-за распада электронного ядра молнии своей немакроэлектронейтральности и неизбежному распаду ШМ.

Можно ожидать, что при быстром массовом истечении отрицательных зарядов (электронов) из ядра исследуемого типа молнии будет наступать быстрый распад электронейтральной оболочки молнии, приводящий к выделению в ее локальной сферической зоне больших запасов накопленной в ней (микродипольной оболочке) электрической энергии (как  $W_0$ , так и ее запасов в слоях между диполями молекул воды). Так как оцененные нами выше значения плотности электрической энергии  $w_0$  в микродипольной оболочке ШМ достигают уровня порядка  $10^{12}$  Дж/м<sup>3</sup>, то быстрое выделение в ограниченном сферическом объеме таких высоких удельных показателей энергии будет сопровождаться воздушным взрывом. Для сравнения этих удельных энергетических данных для ШМ с известными в физике высоких плотностей энергии и лучшего понимания рассматриваемой нами задачи отметим, что удельные показатели энергии, выделяющейся при взрыве химических взрывчатых веществ, локальных взрывах поверхностных микрослоев металла под действием мощного лазерного излучения, а также плотности тепловой энергии в электрически взрывающихся под действием токов большой плотности металлических проводниках достигают значений порядка  $10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> [13, 14]. При медленном тихом распаде электронного ядра и электронейтральной микродипольной оболочки ШМ возможно образование в ее электрически разрушенной сферической зоне лишь небольшого облака, состоящего, наверное, из электронейтральных водяных паров.

## 8. ПУТИ ФОРМИРОВАНИЯ В АТМОСФЕРЕ ШМ НА ОСНОВЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕЛИ

На взгляд автора, исходным центральным высококонцентрированным электрически заряженным "зародышем" (сферическим ядром ШМ) при формировании указанного выше сообщества электрических диполей микрочастиц-сфероидов воды, объединенного в электрически активную сферу-оболочку ШМ, могут служить незавершенные электрические высокоинтенсивные стримеры (электронные лавины с concentra-

цией электронов порядка  $10^{26}$  м<sup>-3</sup>) боковых ветвей ЛМ [1, 2], развивающихся при грозовой деятельности в воздушной земной атмосфере между грозowymi облаками или между грозowym облаком и землей. Кроме того, ранее автором на основе положений квантовой физики было показано, что при дрейфе свободных электронов (этих квантовомеханических объектов) в проводнике (или сильноточном плазменном канале ЛМ в воздушной атмосфере) вдоль пути их движения могут образовываться локальные продольные периодические области из высококонцентрированных электронов [15, 16]. Линейные размеры таких электронных образований (электронных сгустков) в нашем случае согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга определяются электронной плотностью  $\delta_e$  электрического тока в сильноточном воздушном разрядном канале ЛМ диаметром до 1 м и в соответствии с формулой (5) из [16] при реальных для ЛМ значениях  $\delta_e = (1-10) \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup> и плотности электронов  $n_e$  в канале молнии порядка  $10^{26}$  м<sup>-3</sup> могут составлять от единиц до десятков миллиметров. Поэтому причиной образования высококонцентрированных электронных сгустков (центрального "зародыша" или отрицательного ядра ШМ) в воздушной атмосфере при развитии в ней ЛМ могут быть квантовомеханические эффекты, возникающие в боковых незавершенных разрядных ветвях ЛМ при протекании по ним свободных электронов высокой концентрации.

После завершения при ЛМ грозowych электрических разрядов указанные высококонцентрированные электронные образования (электронные сгустки), стохастически локализованные приблизительно в форме микросфер в воздушной атмосфере, могут стать тем отрицательно заряженным высококонцентрированным электрическим центром (ядром), вокруг которого могут послойно группироваться радиально ориентированные электрические микродиполи из микрочастиц и молекул влаги и образовывать таким путем сферический макрообъем ШМ, взвешенный в воздухе. Здесь важно отметить то обстоятельство, что при формировании вокруг такого электронного ядра молнии первого слоя электрических микродиполей воды компенсации ядром поляризационных связанных электрических зарядов этих диполей, расположенных на их краевых поверхностях, происходить не будет. Причиной тому является связанность данных поверхностных некомпенсированных зарядов в микрочастицах (молекулах) воды. На то, что подобные микрочастицы (молекулярные соединения) влаги могут образовывать взвешенные и сравнительно легко перемещающиеся в воздухе макрообразования достаточно прямо указывают бесчисленные метеорологические данные (например, образование в воздушной атмосфере тумана или тех же грозowych облаков, но, правда, с несколько иной массовой плотностью). Перемещающаяся в воздушном электрически наэлектризованном и поляризованном пространстве, особенно после воздействия на него и на содержащиеся в нем микрочастицы и молекулы воды высокоинтенсивных электромагнитных процессов (больших импульсных токов, сильных электрических и магнитных полей), неиз-

менно сопровождающих ЛМ, и втягивая в свою сферическую активную зону все новые электрические микродиполи влаги, ШМ за счет радиального постадийного (методом "слой за слоем") выстраивания по сферической поверхности этих электрических микродиполей увеличивает свои геометрические размеры и соответственно запасы электрической энергии  $W_0$ , накапливаемой в ее тонких междипольных (межмолекулярных) воздушных (вакуумных) сферических слоях оболочек.

Что необходимо для образования в воздушной атмосфере ШМ? В соответствии с предложенной автором приближенной физико-математической моделью такого природного электрофизического феномена как ШМ для этого, прежде всего, необходимо:

- во-первых, наличие в воздушной атмосфере высококонцентрированного электрически активного центрального электронного "зародыша" (отрицательно заряженного ядра ШМ) примерно сферической формы со сравнительно большим отрицательным электрическим зарядом, который может стать электрическим центром для объемного послойного формирования вокруг него радиально ориентированных электрических микродиполей (поляризованных микрочастиц-сфероидов и молекулярных диполей) воды, образующих электронейтральную оболочку ШМ;
- во-вторых, наличие в воздушной атмосфере взвешенных в ней электрических микродиполей (поляризованных микрочастиц-сфероидов с полярными молекулами) воды в количестве, достаточном для образования вокруг центрального высококонцентрированного электрического "зародыша" примерно сферической формы (отрицательно заряженного ядра молнии) электрически нейтральной оболочечной макроскопической структуры ШМ, состоящей из поляризованных микрочастиц с полярными молекулами воды и определяющей геометрические размеры сферы ШМ;
- в-третьих, наличие в воздушной атмосфере такой активной электромагнитной и метеорологической обстановки (совокупности движущихся и покоящихся электрических зарядов, электрических и магнитных полей, а также перемещающихся воздушных и мелкодисперсных водяных масс), которая может произвести до поляризации взвешенных в воздухе микрочастиц (молекул) воды и массового образования из них в окружающем пространстве электрических диполей влаги микроскопических (молекулярных) размеров;
- в-четвертых, первоначальное выпадение на землю дождевых осадков и дальнейшее протекание в воздушной атмосфере, содержащей мелкодисперсные взвешенные в воздухе частицы влаги, интенсивных грозовых электрических разрядов (ЛМ, являющихся, как правило, предвестником ШМ), способных за счет протекания по сильноточному плазменному каналу ЛМ больших количеств электричества (прежде всего, свободных электронов) вызвать в ней (земной атмосфере) образование активного центрального сфероидального высококонцентрированного электронного "зародыша" или сгустка ШМ (отрицательно заряженного ядра молнии) и электрических микродиполей (поляризованных микрочастиц и молекул) воды.

Анализ приведенных автором выше необходимых основных условий для образования в воздушной атмосфере ШМ свидетельствует о том, что эти физические условия могут вполне реально возникать при протекании в ней ЛМ и наличии в воздухе множественных быстро перемещающихся в мощных электрических полях от ЛМ и подверженных воздействию интенсивных звуковых колебаний (например, из-за ударных акустических волн в воздухе от плазменного разрядного канала ЛМ) микрочастиц влаги, возникающих в атмосфере за счет естественного испарения с поверхности земли воды и дождевых осадков.

Следует отметить, что нам, видимо, требуется исключить из рассмотрения возможное присутствие в ШМ высококонцентрированного положительно заряженного ядра молнии. Возможным основанием для этого может служить то, что, во-первых, маловероятно наличие в воздушной атмосфере высококонцентрированного образования из таких устойчивых античастиц как позитроны, имеющих положительный элементарный заряд и массу, которые по модулю равны соответствующим величинам для электрона. Известно, что эти античастицы в небольших концентрациях содержатся в космических лучах, действующих на земную атмосферу, и являются продуктом ядерных реакций, вероятность активного протекания которых в воздушной атмосфере даже при ЛМ крайне мала. Во-вторых, из других известных и могущих присутствовать в атмосферном воздухе элементарных носителей электричества положительной полярности являются протоны, масса которых  $m_p$  приблизительно равна  $m_p = 1836 \cdot m_e$ , где  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона [7]. В связи с тем, что в природе ШМ может достаточно свободно и сравнительно легко перемещаться в воздушном пространстве и вдоль встречающихся на ее пути физических тел (различных предметов, ограждающих изоляционных и металлических конструкций технических сооружений), то она по своей массе должна иметь весьма незначительные показатели. Этим показателям очевидно больше удовлетворяет отрицательно заряженный и относительно легкий электрон и соответственно отрицательно заряженное высококонцентрированное центральное образование ШМ – сплошное электронное ядро молнии сравнительно малой массы.

Что касается физического механизма радиально-послойного выстраивания по сферическим поверхностям вокруг электрически заряженного центрального "зародыша" (отрицательного ядра ШМ) электрических микродиполей воды, разделенных между собой молекулярными толщинами воздуха (вакуума), и образования таким способом взвешенного в воздухе сферического молекулярно-поляризационного накопителя электрической энергии макроскопических размеров, то здесь он может нами быть представлен пока качественно. Отметим в этой связи то, что возможность формирования такого сложного электрофизического образования как ШМ из центрального электронного сгустка и периферийных электронейтральных микродиполей воды не противоречит законам современной классической электродинамики и электростатики.

В соответствии с общепринятой теорией ориентационной поляризации полярных диэлектриков (например, воды) во внешнем электрическом поле (например, в радиальном электрическом поле от сферического высококонцентрированного электронного ядра ШМ или в ином поле) с напряженностью  $E_B$  действующие на жесткие электрические микродиполи полярного диэлектрика (например, воды) моменты  $M_e = p_e \cdot E_B \cdot \sin \beta$  ( $\beta$  – угол между направлением векторов дипольного момента  $p_e$  молекул воды и напряженности  $E_B$  внешнего электрического поля) стремятся развернуть эти молекулярные диполи так, чтобы их дипольные электрические моменты  $p_e = \alpha \epsilon_0 \cdot E_B$ , где  $\alpha$  – поляризуемость молекул диэлектрика (например, для воды  $\alpha = (\epsilon - 1) / n_0$ ;  $\epsilon = 81$  – относительная диэлектрическая проницаемость воды;  $n_0 = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$  – концентрация полярных молекул воды в ее микрочастице [7]), совпадали по направлению с вектором напряженности  $E_B$  [6]. Такая пространственная ориентация микродиполей воды в радиальном электрическом поле центрального электронного ядра (сгустка) может действительно приводить к послойному радиальному формированию электродипольной внешней водяной оболочки ШМ.

Кроме того, на физическую возможность существования указанного образования из электрических микродиполей воды (этих поляризованных молекулярных соединений химических элементов водорода и кислорода), разделенных молекулярными (атомарными) толщинами вакуума (при таких толщинах зазоров между концами микродиполей воды их воздушные зазоры вырождаются в вакуумные) с уровнями напряженности электрического поля  $E_{ОВ}$  в них (этих вакуумных атомарных зазорах) порядка  $10^{11} \text{ В/м}$ , однозначно указывают результаты оценочных расчетов автора уровня сверхсильных электрических полей в атоме водорода [11]. Напомним, что согласно [11] уровень напряженности электрического поля между положительно заряженным ядром (протоном) и отрицательно заряженным электроном на его основной орбитали (на  $1s$  – электронном подуровне) в атоме водорода (этом простейшем атоме вещества) может достигать порядка  $10^{16} \text{ В/м}$ . Как видим, в равновесном электрическом состоянии микродипольной оболочки ШМ (количество распределенных по сферическому объему поляризованной оболочки вне центрального электронного "зародыша" (сгустка) ШМ связанных отрицательных зарядов равно количеству связанных положительных зарядов) электрического пробоя (завершенного электрического разряда) между противоположно заряженными и коронирующими концами указанных электрических микродиполей и разрушения оболочки ШМ (тихого или взрывообразного) происходить не должно.

По-видимому, данное разрушение оболочки ШМ и самой молнии может начать происходить при нарушении электростатического взаимодействия первого примыкающего к ядру молнии сферического слоя электрических микродиполей воды с отрицательно

заряженным ядром ШМ. Это нарушение может быть вызвано распадом самого ядра молнии, обусловленного, например, массовым отводом его носителей электричества (отдельных электронов из центрального электронного сгустка или "зародыша" отрицательной полярности) из области внутреннего ядра вне сферы (внешней оболочки) ШМ. Данный отвод отрицательных зарядов из ядра молнии может быть связан с контактом электрически коронирующей сферы ШМ с какой-либо металлоконструкцией, имеющей хорошую гальваническую связь с землей. Либо эти электрические нарушения в высококонцентрированном электронном ядре ШМ могут возникнуть при большой утечке через электрические диполи микрочастиц и молекул воды за счет электрической короны накопленных первоначальных зарядов (высококонцентрированных электронов) в области ядра молнии в окружающее ШМ воздушное пространство с распределенными в нем положительными ионами и свободными электронами, образовавшимися из-за процессов активной ионизации при ЛМ присутствующих в воздухе молекул (атомов) различных газов (например, водорода, кислорода, азота и др.).

В обоснование сказанного выше отметим, что полученные нами численные оценки напряженностей  $E_{ОВ}$  и  $E_{ОН}$  для электрического поля внутри в тонких межслойных (межмолекулярных) вакуумных междипольных зазорах сферической оболочки молнии и вне макрообъема ШМ вблизи ее наружной поверхности (порядка  $10^{11} \text{ В/м}$ ) однозначно указывают на то, что как внутри (между торцевыми краями микродиполей с поляризационными зарядами противоположной полярности), так и снаружи сферического образования ШМ (с краев радиально расположенных микродиполей с некомпенсированными связанными зарядами) должна интенсивно проявляться электрическая корона. А, как хорошо известно, из техники высоких (сверхвысоких) напряжений, подобное явление (электрическая корона) из-за электронных стримеров и ионного тока сопровождается ярким свечением, шипением и потрескиванием, то есть теми световыми и шумовыми эффектами, которые и характерны для ШМ [1, 2]. Возможно эта корона и ее незавершенные радиальные электрические разряды в окружающее ШМ воздушное пространство энергетически и подпитываются за счет электрической энергии, сосредоточенной внутри высококонцентрированного электронного сгустка ядра ШМ. Поэтому не исключено, что время "жизни" ШМ может определяться тем временным промежутком ее электрического коронирования, на который и хватает запасенной внутри высококонцентрированного электронного ядра молнии энергии. Обратим внимание читателя и на то, что интенсивная электрическая корона с электрически заряженных тел в воздухе приводит к образованию вокруг них озона и появлению запахов, характерных для горящей серы, то есть к появлению тех дополнительных внешних атрибутов, которыми сопровождается в том числе и исследуемая нами ШМ [1, 2].

## 9. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОГО В АТМОСФЕРЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ШМ

Необходимо обратить внимание, как специалистов, так и просто любознательных читателей, на то, что по непонятным для автора причинам большинство исследователей ШМ проходят мимо активных электрофизических процессов в воздушной атмосфере, предшествующих появлению в ней этого феномена природы. И в этом ряду процессов процесс электрической поляризации такого полярного диэлектрика, каким является вода, служит одним из основных и определяющих, наряду с процессом формирования при ЛМ высококонцентрированного электронного ядра молнии, энергетические затраты природы на создание ШМ. В самой ШМ происходит лишь концентрация этих энергозатрат, как в виде электронного ядра молнии с его мощным внешним электрическим полем, так и в виде сверхсильного электрического поля между поляризованными микрочастицами и молекулами воды. Какие же уровни электрического поля необходимы для разделения и пространственного смещения в полярных молекулах и микрочастицах воды их связанных зарядов и образования на их краях поляризационных зарядов противоположной полярности с поверхностной плотностью, равной  $\sigma_e$ ?

Ответ на данный вопрос кроется в физике диэлектриков, согласно которой для поляризационных некомпенсированных зарядов полярного диэлектрика с поверхностной плотностью  $\sigma_e$ , образованных в результате его помещения во внешнее атмосферного происхождения однородное или неоднородное электрическое поле с напряженностью  $E_B$ , выполняется следующее аналитическое соотношение [6]:

$$\sigma_e = \alpha \epsilon_0 n_0 \cdot E_B. \quad (11)$$

Подставив в (11) приведенное ранее в разделе 8 аналитическое выражение для поляризуемости молекул воды в виде  $\alpha = (\epsilon - 1) / \dots$ , для силового уровня требуемого внешнего электрического поля находим:

$$E_B = \frac{\sigma_e}{(\epsilon - 1)\epsilon_0}. \quad (12)$$

Используя оценочное выражение (6) для  $\sigma_e$ , после элементарных математических операций в соотношении (12) окончательно для необходимого в воздушной земной атмосфере уровня напряженности  $E_B$  внешнего электрического поля, приводящего к требуемой для образования ШМ активной электрической поляризации полярных молекул и микрочастиц воды, получаем:

$$E_B = \frac{5e_0}{\pi r_m^2 (\epsilon - 1)\epsilon_0}. \quad (13)$$

При  $\epsilon = 81$  и  $r_m = 1,925 \cdot 10^{-10}$  м из (13) искомая напряженность  $E_B$  внешнего электрического поля составляет численную величину, примерно равную  $9,718 \cdot 10^9$  В/м. Нетрудно видеть, что полученный уровень для  $E_B$  примерно на два порядка меньше оце-

ненного нами уровня напряженности сверхсильного электрического поля, сосредоточенного между электрическими микродиполями воды в оболочке ШМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены новые физическая модель и гипотеза возникновения в воздушной атмосфере ШМ, для которых приведены определенные теоретические выкладки и количественные оценки. Показано, что электрическая энергия, запасаемая в электронном ядре и дипольной водяной оболочке такого природного электрофизического феномена как ШМ, может черпаться из электрически активной воздушной атмосферы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Юман М.А. Молния.- М.: Мир, 1972.- 327 с.
- [2] Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита.- М.: Знак, 2003.- 330 с.
- [3] Баранов М.И. Ретроспектива исследований в области искусственного и атмосферного электричества и молниезащиты технических объектов// Электротехника і електромеханіка.- 2006.- №6.- С. 5-13.
- [4] Капица П.Л. О природе шаровой молнии // Доклады АН СССР.- 1955.- Том 101.- №2.- С. 245-248.
- [5] Баранов М.И. Петр Леонидович Капица – основоположник техники сильных импульсных магнитных полей// Электротехника і електромеханіка.- 2005.- №3.- С. 5-8.
- [6] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990.- 624 с.
- [7] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики/ Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.- 864 с.
- [8] Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике.- М.: Наука, 1965.- 872 с.
- [9] Миролюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л. и др. Методы расчета электростатических полей.- М.: Высшая школа, 1963.- 415 с.
- [10] Иосель Ю.Я., Качанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости.- Л.: Энергия, 1981.- 288 с.
- [11] Баранов М.И. Приближенный расчет сверхсильных электрических и сильных магнитных полей в атоме вещества // Электротехника і електромеханіка.- 2006.- №6.- С. 60-65.
- [12] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972.- 391 с.
- [13] Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии/ Под ред. В.Н. Карношина. Минск: Наука и техника, 1983.- 151 с.
- [14] Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Экспериментально-аналитическое определение удельной энергии электротеплового разрушения медных проводников под воздействием больших импульсных токов// Электротехника і електромеханіка.-2004.- №2.- С. 70-73.
- [15] Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехника.-2005.- №7.- С. 25-33.
- [16] Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике// Технічна електродинаміка.-2007.-№1.- С. 13-19.

Поступила 14.03.2008

## ИССЛЕДОВАНИЯ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УГЛОВЫХ ИЗГИБОВ В ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ

Батыгин Ю.В., д.т.н., проф., Маджид Бижар  
 Национальный технический университет "Харьковский политехнический университет"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Высшей математики"  
 тел. 057) 707-60-87, E-mail: batygin@kpi.kharkov.ua

Сериков Г.С.  
 Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, кафедра "Автомобильной электроники",  
 тел. 700-38-52

*Експериментальні дослідження індукторних систем для формування кутів в ізгибах листових металевих заготовок, які були проведені, підтвердили достовірність результатів теоретичних досліджень і, відповідно, практичну роботоздатність запропонованих конструкцій інструментів для виконання заданої технологічної операції. Урахування кінцевої поперечної протяжності показало, що реальна ширина токопроводів значительно зніжує амплитуди збуджених полів та тисків.*

*Проведенные экспериментальные исследования индукторных систем для формирования углов в изгибах листовых металлических заготовок подтвердили достоверность результатов теоретических исследований и, соответственно, практическую действенность предложенных конструкций инструментов для выполнения заданной технологической операции. Учёт конечной поперечной протяжённости показал, что реальная ширина токопроводов значительно снижает амплитуды возбуждаемых полей и давлений.*

Простые и эффективные конструкции инструментов для магнитно-импульсной формовки чётких углов в изгибах металлических листов предложены авторами работы [1]. Проведенные вычисления позволили теоретически обосновать действенность одновитковых соленоидов прямоугольной формы и их различных модификаций.

Теоретические исследования требуют экспериментального подтверждения.

Кроме того, в цитируемой работе токопроводы индукторной системы полагались достаточно тонкими, хотя из феноменологических соображений очевидно, что поперечные размеры источников поля должны влиять на процессы возбуждения электромагнитных полей. Очевидно, что должны измениться амплитуды напряжённости и давлений, должны измениться формы распределений и т.д. Всё это требует дополнительных оценок.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование одновитковых индукторных систем прямоугольной геометрии для формовки углов в листовых заготовках и обобщение ранее полученных решений для тонких токопроводов на случай, когда последние обладают конечной протяжённостью.

Источник мощности – экспериментальный стенд, специально созданный для адекватного моделирования реальных электромагнитных процессов. Фактически, стенд представляет собой модельную магнитно-импульсную систему, работающую в слаботочном режиме многократного повторения разрядных импульсов, следующих с частотой, кратной рабочей частоте напряжения питающей промышленной сети (50 Гц, 25 Гц и т.д.). Периодически повторяющаяся картинка разряда формируется в устойчивое стационарное изображение на экране осциллографа (аналогия со стробоскопическим эффектом!). Стенд позво-

ляет проводить необходимые измерения при низких напряжениях и относительно малых токах в объектах исследования [2].

Источник импульсного магнитного поля – протяжённый одновитковый соленоид прямоугольной формы. Одной из своих сторон он обращён к углу в листовой алюминиевой заготовке с одним изгибом (рис. 1). Её толщина – 0.001 м. Размеры плоскостей одинаковы и равны, соответственно  $0.2 \times 0.06 \text{ м}^2$ .

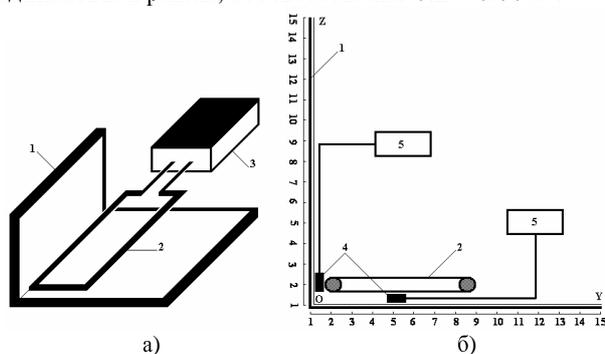


Рис. 1. Экспериментальная система:

- а) схематическое изображение исследуемой индукторной системы в аксонометрии; б) поперечное сечение индукторной системы в зоне измерений;  
 1 – изогнутая листовая заготовка, 2 – собственно индуктор, 3 – генератор синусоидального тока, 4 – измерительные катушечные зонды, 5 – осциллограф

Для однозначности выводов в измерениях первоначальный угол был выбран строго прямым. Последующие эксперименты проводились с листовым металлом, перпендикулярные плоскости которого в области изгиба сочленились с закруглением по радиусу  $\approx 0.01 \text{ м}$ .

Экспериментальная модель индуктора была выполнена из медного проводника диаметром 0.0015 м.

Размеры витка выбирались так, чтобы исключить влияние краёв листового металла и клемм подключения токопровода к источнику питания на результаты исследований. Размеры соленоида:  $0.15 \times 0.02 \text{ м}^2$ . Измерения проводились в области, соответствующей средней части алюминиевого листа (и, соответственно, витка).

На вход индуктора подавался ток с временной зависимостью в виде экспоненциально затухающей синусоиды с частотой  $f \approx 33 \text{ кГц}$  и относительным декрементом затухания  $\delta \approx 0.15$ .

Измерительные зонды представляли собой катушки из достаточно тонкого провода, намотанные на диэлектрические полосы с шириной до  $\approx 0.01 \text{ м}$  и толщиной до  $\approx 0.00025 \text{ м}$ . Соответствующие расчёты и конструктивные особенности измерительных зондов описаны в [2].

Катушки располагались перпендикулярно касательной компоненте вектора напряжённости магнитного поля, вдоль осей  $OY$  и  $OZ$ , соответственно, между токопроводами витка и плоскостями листового металла. В зоне измерения поперечный размер намотки не превышал  $\approx 0.001 \text{ м}$ .

Сигнал с обмотки измерительных зондов подавался на вход осциллографа.

Конкретной целью проводимых экспериментов являлось определение характеристик поля и, соответственно, плотности тока на поверхностях листовой заготовки. По данным этих измерений можно судить о пространственном распределении сил магнитного давления в угловой зоне изогнутого металла.

Первая группа экспериментов была посвящена измерениям в случае, когда плоскость витка индуктора строго компланарна плоскости горизонтальной плоскости угла.

Результаты измерений представлены на рис. 2.

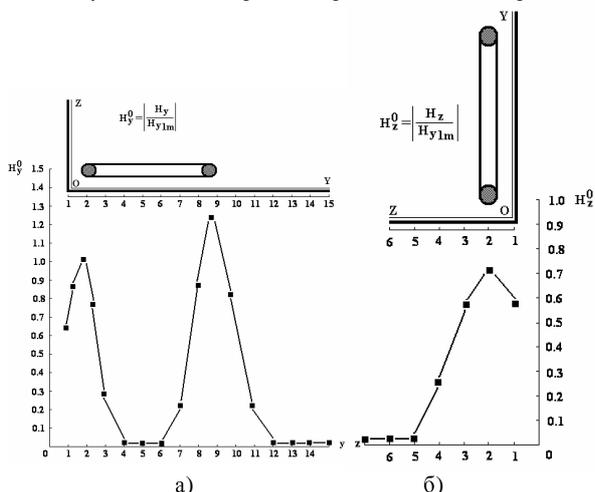


Рис. 2. Пространственное распределения модуля относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля на угловых поверхностях изогнутого листа, (нормировка производилась на максимальное значение напряжённости вблизи угла): а) горизонтальная поверхность; б) вертикальная поверхность.

Из результатов измерений следует.

- В данном варианте индукторной системы на горизонтальной плоскости изгиба плотность возбуж-

даемого тока имеет два локальных максимума: первый из них расположен вблизи угла под соответствующим "ближним" токопроводом (позиция №2 на рис. 2а), второй – под "дальним" токопроводом прямоугольного витка (позиция №9 рис. 2а).

- Величина второго максимума превышает первый в 1.25 раза, что можно объяснить рассеянием электромагнитной энергии первого витка на возбуждение поля в металле ортогональной поверхности изгиба.

- Максимум возбуждаемого поля на вертикальной плоскости (позиция №2 рис. 2б) составляет 70% от аналогичного параметра для поля "ближнего" угла.

Условия проводимого эксперимента практически соответствуют режиму резкого поверхностного эффекта. И в оценках электродинамических усилий можно считать, что амплитуды возбуждаемых сил давления будут пропорциональны квадратам амплитуд соответствующих компонент напряжённости магнитного поля.

**Примечание.** Отношение максимумов напряжённости поля при угле наклона  $\approx 15^\circ$  и  $\approx 0^\circ$  составляет  $\approx 0.84$ .

Таким образом, в угловой зоне на горизонтальную и вертикальную плоскости будут действовать силы, отличающиеся по амплитуде почти в 2 раза. Их равнодействующая с точкой приложения, соответствующей максимумам напряжённости (пересечение прямых по позициям №2 на рис. 2 а,б), будет направлена не в сторону собственно угла, а со значительным смещением вдоль горизонтальной плоскости.

На металл горизонтальной поверхности в области "дальнего" токопровода (позиция №9 рис. 2а) будет действовать давление с амплитудой, превышающий максимум в угловой зоне (позиция №2 рис. 2а) в 1.56 раз.

В целом, наиболее существенным недостатком исследованной конструкции индукторной системы является возбуждение сил давления на листовую заготовку вне зоны, где требуется формовка чёткого угла.

Устранить данный недостаток при сохранении именно одного соленоида, то есть, снизить амплитуды сил давления вне заданной области, можно, если плоскость витка индуктора расположить под некоторым углом к горизонтальной поверхности изгиба.

Как следует из физических соображений, при увеличении расстояния от токопровода до металла должна падать амплитуда магнитного поля на его поверхности. Действительно, этот факт подтверждается на практике. В зоне под "дальним" токопроводом (позиция №9 рис. 3а) величина напряжённости снижается более чем в 4 раза. А сила давления уменьшается, соответственно, в 16 раз. Отмечается также сдвиг положений максимумов вблизи угла к его центру.

Амплитуда касательной компоненты вектора магнитного поля на вертикальной плоскости изгиба возрастает почти в 1.15 раз (рис. 3б).

Результаты проведенных измерений индуктора инициировали эксперименты с дальнейшим увеличением угла наклона плоскости витка. Естественно, что его увеличение ограничено значением  $\approx 45^\circ$ . Дальнейший рост приводит просто к перемене местами ролей горизонтальной и вертикальной плоскостей изгиба в процессе возбуждения вихревых токов в металле листа.

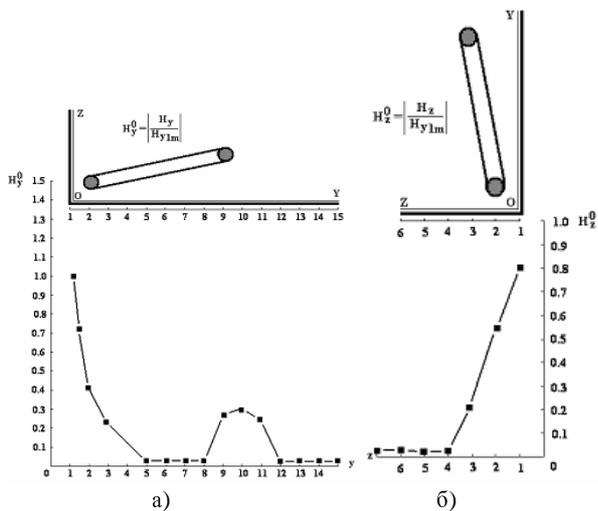


Рис. 3. Модуль относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля при угле наклона плоскости витка к горизонтальной поверхности  $\approx 15^\circ$ , (нормировка производилась на максимальное значение напряжённости вблизи угла): а) горизонтальная поверхность; б) вертикальная поверхность

Не приводя графических иллюстраций, прокомментировав полученные результаты.

Как следует из измерений, практически действенными остаются лишь силы магнитного давления только в области собственно угла, хотя их абсолютные величины по сравнению с горизонтальным расположением витка снижаются более чем в 2 раза. Но положения максимумов поля и сил сдвигаются к центру угла, а их величины выравниваются. В данном конструктивном исполнении индукторной системы можно ожидать, что равнодействующая ponderomotive сил, действующих на ортогональные поверхности изгиба, будет направлена строго в его центр. В конечном итоге, возможно практическое целенаправленное магнитное давление именно в угол и, как результат, его чёткая формовка.

Недостатком одновитковой индукторной системы с наклонным соленоидом является достаточно слабая электродинамическая связь тока витка и тока, индуцированного в металле листа. Кроме того, юстировка соленоида, обеспечивающего магнитное давление строго по центру угла изгиба, достаточно сложная практическая задача.

Необходимость юстировки обусловлена необходимостью симметрии как геометрической, так и электродинамической, относительно биссектрисы формуемого угла изгиба. Нарушение этой симметрии приведёт к перекосу амплитуд вихревых токов, возбуждаемых в металле угловых плоскостей, как следствие, к изменению направления равнодействующей электродинамического давления и к искажению результата магнитно-импульсного воздействия.

Более устойчивой по отношению к положению источника поля и более эффективной с точки зрения возможных амплитуд силового воздействия является индукторная система со спаренными наклонными соленоидами (рис. 4, поперечное сечение вверху).

Конструктивно, такая система выполняется в виде двух протяжённых прямоугольных витков, распо-

ложенных под заданным углом друг к другу (соответственно, каждый виток будет иметь определённый наклон к своей поверхности изгиба). Вдоль одной из длинных сторон витки соединяются механически. Электрический контакт может быть, а может и не быть. В зависимости от способа их включения (между собой!) и подключения к источнику мощности, витки могут образовывать параллельные или последовательные контура.

При последовательном подсоединении витков величина тока в центральном токопроводе удваивается. По протяжённым параллельным ветвям будет протекать токовый импульс с амплитудой, равной амплитуде тока источника. В целом, эффективность индукторной системы при таком соединении витков существенно возрастает (почти в 4 раза по сравнению с предыдущим вариантом их включения).

Следует отметить, что нечто подобное в виде отдельных прямоугольных контуров, имеющих одну общую сторону, предлагалось авторами [2] для штамповки изделий из тонкостенной медной фольги. Инструменты такого рода были ими названы как "индукторные системы со спаренными токопроводами".

Результаты измерений напряжённости магнитного поля в пространстве между токопроводами индуктора и поверхностями листовой заготовки приведены на рис. 4. Витки включались последовательно и параллельно. Угол их наклона к соответствующим плоскостям составлял  $\approx 15^\circ$ .

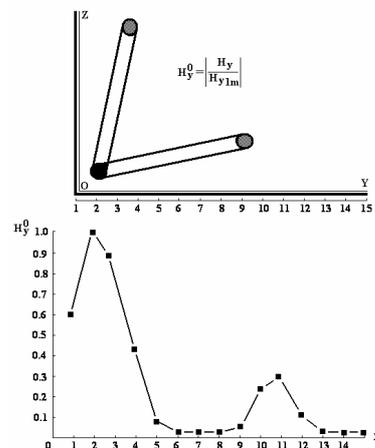


Рис. 4. Индукторная система и модуль относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля на угловых поверхностях изгиба металлического листа (нормировка производилась на максимум напряжённости вблизи угла, позиция №2)

Из измерений следует, что в исследованной индукторной системе

- пространственное распределение касательной составляющей напряжённости магнитного поля обеспечивает распределение сил давления, необходимое для формовки достаточно чётких углов в зоне изгиба листовой металлической заготовки;
- равнодействующая сил магнитного давления, возбуждаемых в рабочей зоне, будет направлена строго в центр формуемого угла, а её амплитуда превышает более чем на порядок аналогичный показатель силового воздействия вне рабочей зоны;

• при последовательном соединении витков индукторной системы существенно возрастает эффективность силового воздействия за счёт удвоения тока в центральном токопроводе, расположенном вдоль линии изгиба.

Как было ранее указано, в теоретическом рассмотрении, выполненном авторами работы [1], токопроводы индукторной системы полагались достаточно тонкими.

Для большей иллюстративности в описании следующих экспериментов приведём результаты расчётов электромагнитных характеристик, учитывающие их возможную конечную протяжённость [3].

Не останавливаясь на повторении тривиальных процедур вычисления Фурье-образов возбуждающих токов выпишем из работы [3] аналитическое выражение для касательной компоненты напряжённости магнитного поля на горизонтальной поверхности изгиба листовой заготовки при  $l = h$ .

$$H_y^0(y, z=0) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} \cdot \left[ \sin\left(y\left(1 + \frac{a}{2h}\right)\right) \cdot \sin\left(y \cdot \frac{a}{2h}\right) - \left(\frac{a}{b}\right) e^{-y\left(\frac{D}{h}\right)\sin\alpha} \sin\left(y\left(1 + \frac{a+b}{2h} + \frac{D}{h}\cos\alpha\right)\right) \cdot \sin\left(y \cdot \frac{b}{2h}\right) \right] dx, (1)$$

где 
$$H_y^0(y, z=0) = \frac{H_y(t, y, z=0)}{\left(\frac{I(t)}{\pi \cdot a}\right)}$$

Магнитное давление на горизонтальную поверхность плоского угла также может быть рассчитано с помощью выражения (1).

На рис. 5 приведены графические иллюстрации экспериментальных и расчётных результатов пространственного распределения напряжённости для индукторной системы с  $a = 0.005$ ,  $D = 0.02$ ,  $b = \text{var}$ ,  $\alpha = \text{var}$ . Значения напряжённости нормировались на величину её расчётного максимума для тангенциальной компоненты поля "ближнего" токопровода. То есть, на графиках приведены зависимости для

$$H_{y,z}^0 = \frac{H_{y,z}}{H_{m1}}$$

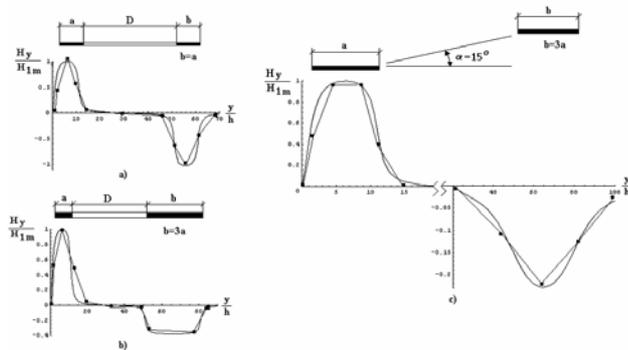


Рис. 5. Распределение тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля вдоль горизонтальной поверхности углового изгиба листовой заготовки, — рассчитанное по формуле (1), — результаты измерений.

а)  $\alpha = 0^\circ$ ,  $b = a$ ; б)  $\alpha = 0^\circ$ ,  $b = 3 \cdot a$ ; в)  $\alpha = 15^\circ$ ,  $b = 3 \cdot a$ .

На основании результатов расчета и эксперимен-

та можно скорректировать выводы предыдущей идеализации, сделанных без учёта конечной поперечной протяжённости токопроводов индуктора.

• Амплитуды возбуждаемых полей и давлений, действительно, снижаются с ростом протяжённости токопровода. Очевидно, что поля с более высокими напряжённостями возбуждаются при стремлении к нулю отношения ширины и расстояния до проводящей плоскости.

• Экспериментально подтверждено, что в случае конечной ширины токопроводов превышение второго максимума над первым как для напряжённости, так и давления существенно ниже, чем в случае тонких проводников (рис. 5а).

• Результаты измерений показывают, что при неизменной ширине "ближнего" токопровода увеличение ширины "дальнего" приводит к весьма ощутимому снижению напряжённости и сил давления с его стороны (рис. 5б).

• Действительно, комбинирование угла наклона плоскости, в которой расположены токопроводы, и ширины "дальнего" токопровода позволяет реализовать довольно высокий уровень концентрации поля и сил магнитного давления в угловой зоне изогнутого металлического листа (рис. 5в).

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные экспериментальные исследования индукторных систем для формирования углов в изгибах листовых металлических заготовок подтвердили достоверность результатов теоретических исследований и, соответственно, практическую действенность предложенных конструкций инструментов для выполнения заданной технологической операции.

2. Как показали измерения, при последовательном соединении витков индукторной системы со спаренными наклонными соленоидами существенно возрастает эффективность силового воздействия за счёт удвоения тока в центральном токопроводе, расположенном вдоль линии изгиба.

3. Учёт конечной поперечной протяжённости позволяет скорректировать выводы для идеализации достаточно тонких токопроводов индуктора. Их реальная ширина значительно снижает амплитуды возбуждаемых полей и давлений.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Батыгин Ю.В., Сериков Г.С., Головащенко С.Ф., Магнитное поле и давления, возбуждаемые одновитковым индуктором в угловом изгибе листовой заготовки. // *Электротехника і електроніка*. Харьков. 2006. №6, с.66-71.
- [2] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко 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.
- [3] Сериков Г.С., Магнитное поле и давления, возбуждаемые индуктором с токопроводами конечной ширины, в угловых изгибах заготовки. // *Электротехніка і електроніка*. Харьков. 2008. №5, С. 70-71.

Поступила 26.02.2008

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИНДУКЦИОННЫМИ ИНДУКТОРНЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ

Батыгин Ю. В., д.т.н., проф.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, кафедра "Высшая математика"

тел. (057) 707-62-45

Чаплыгин Е.А.

Харьковский Национальный автомобильно-дорожный университет

Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, "Автомобильная электроника"

тел. (057) 700-38-52, Email: batygin@kpi.kharkov.ua, chaplygin\_e\_a@mail.ru.

Черногор Т.Т.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, кафедра "Высшая математика"

тел. (057) 707-62-45

*У даній роботі запропоновано конструкційне рішення по збільшенню ефективності магнітно-імпульсного притягнення у індукційних індукторних системах. технічна сутність зводиться до вибору геометричної форми допоміжного екрану, що дозволяє зменшити відстань між взаємодіючими об'єктами. Проведена апробація експериментальної моделі показала її практичну дію.*

*В настоящей работе предложено конструктивное решение по увеличению эффективности магнитно-импульсного притяжения в индукционных индукторных системах. Техническая сущность предложения сводится к выбору геометрической формы вспомогательного экрана, позволяющей уменьшить расстояние между взаимодействующими объектами. Проведенная апробация экспериментальной модели показала её практическую действенность.*

### ВВЕДЕНИЕ

Разработки инструментов для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов инициированы производственными операциями по реставрации кузовных покрытий легковых автомобилей и корпусов самолётов. Речь идёт о выравнивании металлических поверхностей с вмятинами, появляющимися по тем или иным причинам в процессе эксплуатации. Причём, как показывает опыт, наибольший интерес вызывает возможность применения, так называемой, внешней рихтовки без разборки корпуса и нарушения существующего лакокрасочного покрытия [1].

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Фирмой "Beulentechnik AG" (Швейцария) предложен довольно обширный ряд механических способов внешней рихтовки вмятин в автомобильных кузовах [2]. Однако, их практическое осуществление требует очень высокой квалификации исполнителя и не обладает достаточной надёжностью с точки зрения сохранности ремонтируемого элемента. Последнее замечание означает, что в процессе реставрации возможно и его разрушение.

Наиболее реальными для практики и эффективными с точки зрения силового воздействия представляются магнитно-импульсные комплексы для внешней рихтовки корпусов самолётов, созданные на протяжении последних 35...40 лет фирмами "Boeing" и "Electroimpact" (США) [2]. Физический принцип, положенный в их основу сводится к использованию

"медленного" и "быстрого" магнитных полей. Первое свободно проникает сквозь обрабатываемый металл. Второе, вследствие достаточно высокой частоты, концентрируется в рабочей зоне индуктора-инструмента. Суперпозиция этих полей позволяет достичь притяжения заданного участка с вмятиной в течение определённого временного интервала. Для практической реализации данного предложения необходимы два источника электромагнитной энергии, достаточно сложные высоковольтные системы управления и синхронизации генерируемых токовых импульсов. Эти факты существенно снижают надёжность работы комплекса для устранения вмятин в целом и значительно увеличивают его стоимость.

Задача о притяжении листовых металлов с помощью силового воздействия со стороны электромагнитных полей может быть решена также и с использованием самых разнообразных технических решений, выдвинутых в разное время разными авторами и отличных от вышеупомянутых предложений фирм "Boeing" и "Electroimpact" (США).

К таковым, например, можно отнести различные вариации способа, описанного в монографии [3] и заключающегося в создании медленно нарастающего магнитного поля, резко прерываемого при достижении заданного уровня напряжённости. При этом в обрабатываемой заготовке наводятся вихревые токи, экранирующие внутреннее поле и препятствующее его уменьшению. Направление индуцированных токов таково, что возникающие электродинамические

усилия притягивают заготовку к индуктору, вызывая её деформирование.

Принципиальная действенность индукционных индукторных систем, основанных на взаимном притяжении проводников с одинаково направленными токами, проиллюстрирована в научных публикациях [4,5] и защищена патентами [6,7].

Практической апробации подвергалась одновитковая цилиндрическая конструкция с двумя одинаковыми листовыми металлами, один из которых играл роль дополнительного вспомогательного экрана и жёстко закреплялся на диэлектрическом основании. Второй лист представлял собой заготовку, подлежащую деформированию. Оба листовых металла располагались симметрично по обе стороны витка индуктора.

Источник мощности – магнитно-импульсная установка МИУ-10, с запасаемой энергией 10 кДж. Рабочая частота составляла ~ 3.5 кГц.

Для большей информативности приведём её основные технические характеристики.

- максимальная запасаемая энергия накопителя – 9,6 кДж;
- номинальное напряжение – 20,0 кВ;
- емкостной накопитель 48,0 мкФ;
- количество конденсаторов – 4;
- собственная индуктивность – 76,0 нГн;
- собственная частота – 83,0 кГц;
- тип разрядника – воздушный тригatron;
- масса ориентировочная 700,0кг;
- габаритные размеры установки, в плане – 1520x800 мм, высота – 850 мм;
- напряжение питающей сети – 380,0 В.

Под действием сил притяжения заготовка деформировалась по форме внутреннего окна индуктора. Проведенные эксперименты ограничились лишь

вытягиванием заданных участков до образования выпуклостей на её поверхности. Их результаты показаны на рис.1.

Устранение полученных деформаций притяжением в данной конструкции индукционной индукторной системы оказалось малоэффективным. Основная причина – ослабление электродинамического взаимодействия токов экрана и заготовки вследствие увеличения расстояния между ними.

Для реализации эффекта притяжения листовую заготовку следовало расположить вогнутостью к вспомогательному экрану. С его стороны данный участок теперь представлял собой вмятину, подлежащую устранению. Если учесть реальную толщину витка индуктора, изоляционных прокладок и глубину вмятины, то расстояние между проводниками с взаимодействующими токами оказалось почти вдвое большим по сравнению с первоначальным вариантом строго компланарных листовых поверхностей, когда реализовалось "вытягивание". Силы притяжения значительно упали. Их воздействие стало недостаточным для эффективного осуществления апробируемой производственной операции.

Из проведенного анализа следует, что для увеличения электродинамических усилий и устранения вмятин необходимо уменьшить расстояние между взаимодействующими объектами.

#### ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель настоящей работы – анализ, предложение и экспериментальная апробация решения по увеличению эффективности магнитно-импульсного притяжения в индукционных индукторных системах.

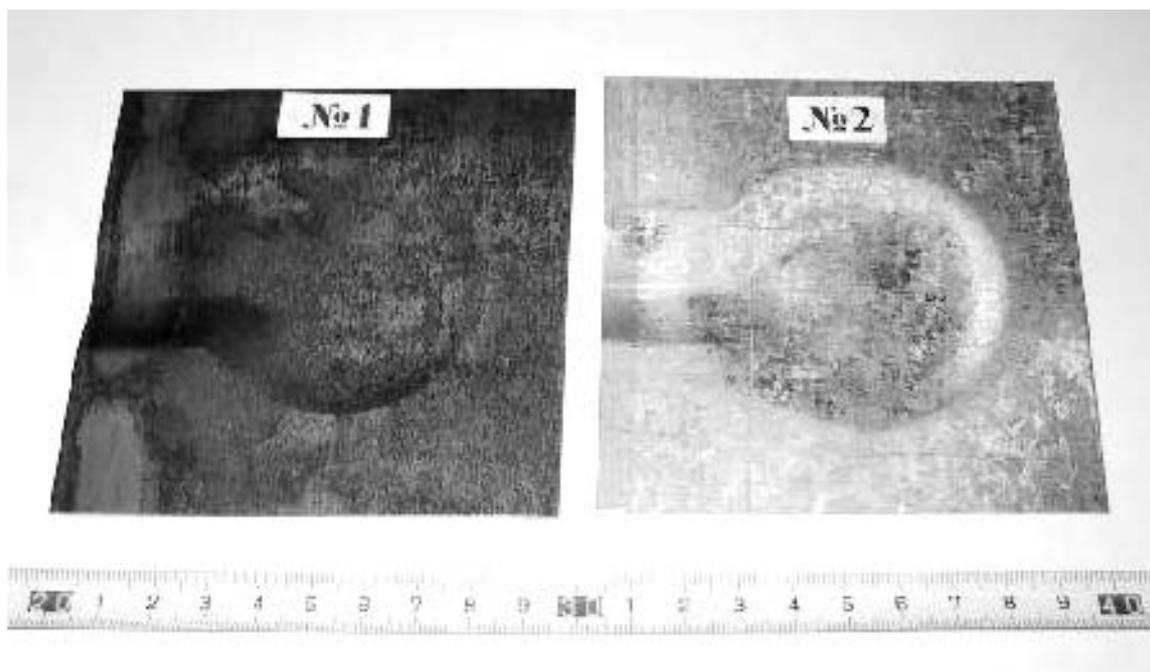


Рис. 1. - Образцы стальных листов, деформированные притяжением заданных участков, №1 – электротехническая сталь, №2 – оцинкованное железо

### ЭКСПЕРИМЕНТ, РЕЗУЛЬТАТЫ, ОБСУЖДЕНИЕ

Поставленная цель может быть достигнута, если часть экрана в рабочей зоне индукторной системы (это внутреннее окно витка) следует выполнить выпуклой и частично выступающей над плоскостью витка. В идеале, форма вспомогательного экрана в рабочей зоне индукторной системы должна бы повторять форму устраняемой вмятины. В этом случае рас-

стояние между проводниками с взаимодействующими токами может быть уменьшено до сколь угодно малой величины. Ограничение определяется лишь толщиной необходимой изоляционной прокладки и геометрической формой вмятины.

Такая конструкция индукционной индукторной системы была изготовлена. Её основные элементы представлены на рис.2 и рис.3.

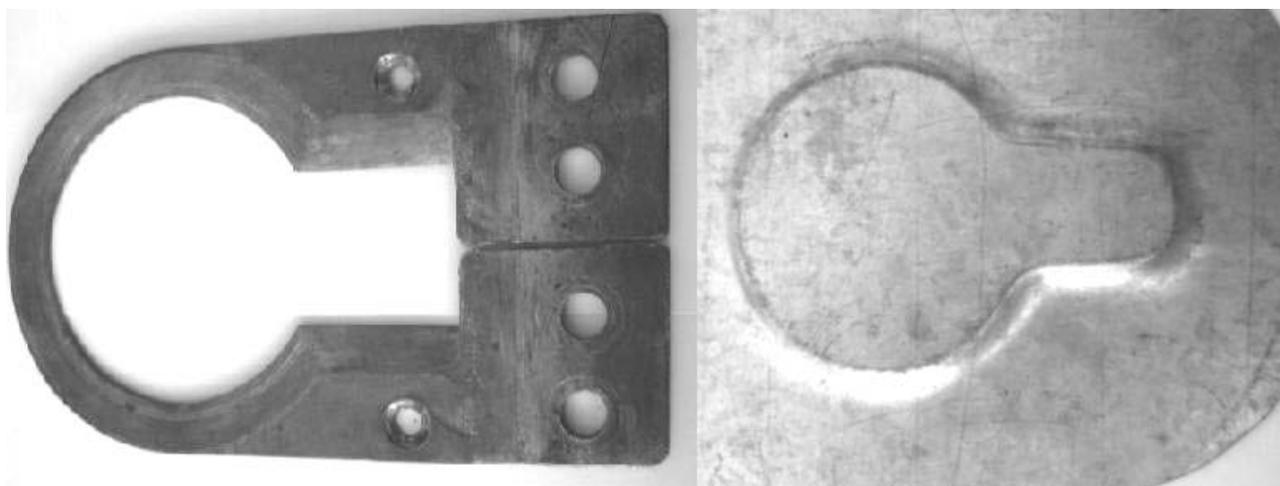


Рис.2 - Одновитковый индуктор и выпуклый вспомогательный экран

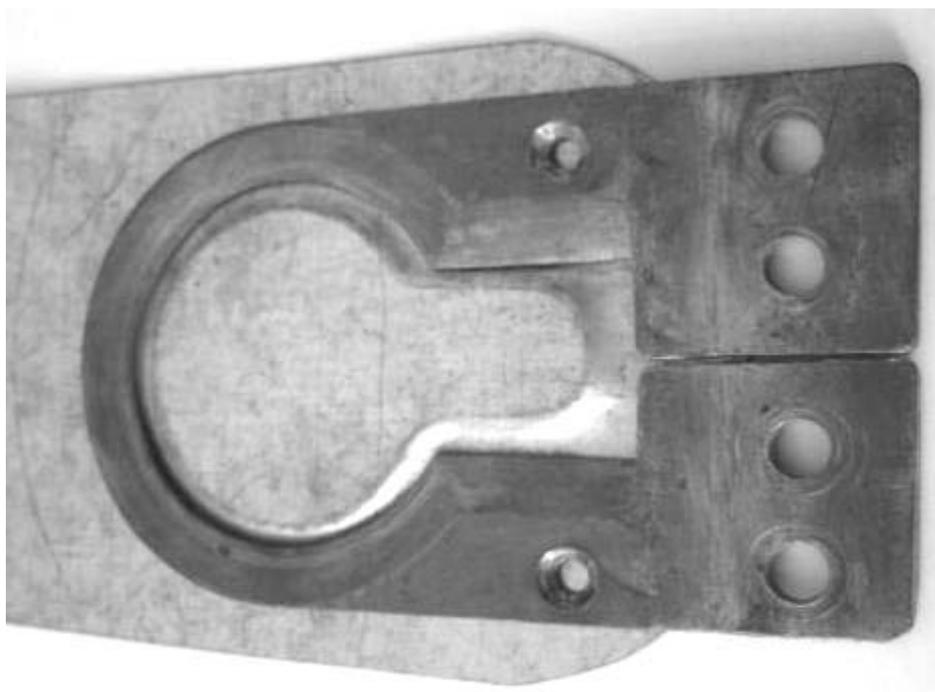


Рис.3. - Индуктор с выпуклым экраном в сборе

Предложенное конструктивное решение для инструмента магнитно-импульсного притяжения было протестировано практически.

В качестве источника мощности использовалась та же магнитно-импульсная установка МИУ-10, что и в предыдущих экспериментах, описанных авторами [4].

В листовом образце ~ 0.8 мм из обшивки кузова

автомобиля фирмы "Мицубиси" толщиной были выполнены две идентичные вмятины. Одна из них – контрольная, вторую следовало устранить с помощью магнитно-импульсного воздействия.

Проведенные эксперименты дали позитивные результаты. Эффективность притяжения существенно возросла. Этот факт отражён на рис.4.

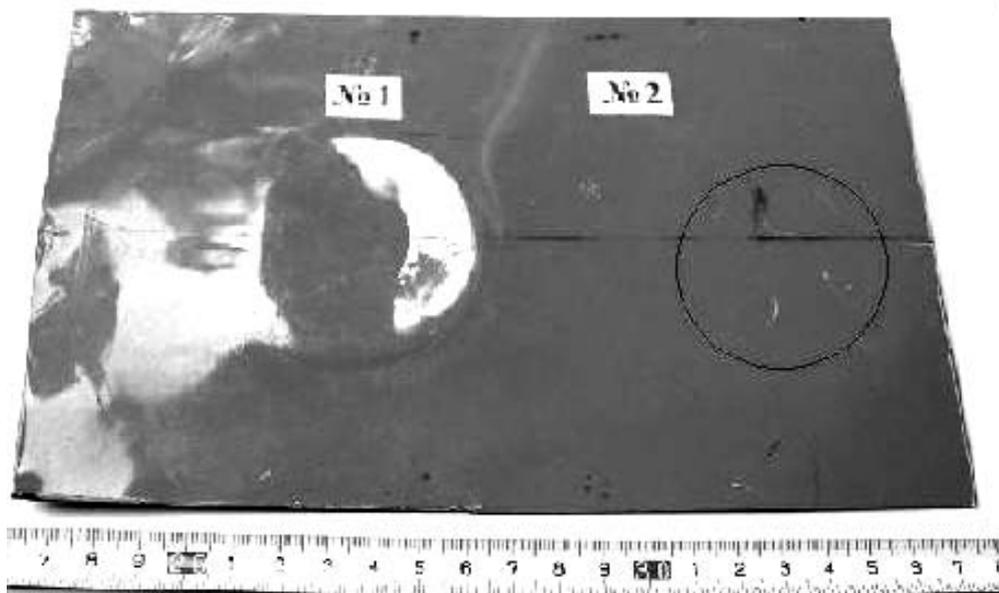


Рис.4. - Экспериментальный образец листовой стали кузова автомобиля фирмы "Мицубиси", №1 – исходная контрольная вмятина, №2 – результат устранения идентичной вмятины с помощью магнитно-импульсного притяжения

#### ВЫВОДЫ

Из проведенных экспериментов следует, что:

- выполнение вспомогательного экрана индукционной индукторной системы выпуклым позволяет уменьшить расстояние между взаимодействующими токами и увеличить эффективность магнитно-импульсного притяжения листовых металлов,
- сформулированное и апробированное предложение можно рассматривать как одно из возможных конструктивных решений по исполнению реального рабочего инструмента,
- практический вариант индукционной индукторной системы должен предусматривать прочностные показатели, необходимые для надёжной эксплуатации в течение заданного рабочего срока.

- [5] Батыгин Ю. В., Бондаренко А. Ю., Чаплыгин Е. А. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // *Авіаційно-космічна техніка і технологія* 2007, № 11(47) с.109-117.
- [6] Патент України 31751, В21Д26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок методом притягання до індуктора / Батигін Ю. В., Бондаренко О.Ю., Чаплигін С. О.; опубл. 25.04.2008. Бюл. №8, 2008р.
- [7] Патент України 31752, В21Д26/14. / Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок / Батигін Ю.В., Бондаренко О. Ю.,Серіков Г. С.; опубл. 25.04.2008. Бюл. №8, 2008р.

*Поступила 13.03.2008*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Батыгин Ю. В., Сериков Г. С., Чаплыгин Е. А. Реализация и перспективы магнитно-импульсных методов в развитии передовых технологий современности. // *Автомобильный транспорт. Сб. науч. трудов, Вып. 18, 2006, С.83-87.*
- [2] Батыгин Ю. В., Бажинов А.В., Чаплыгин Е.А. Использование энергии импульсных полей в автомобильной промышленности. // *Автомобильный транспорт. – Харьков: ХНАДУ. 2005, - Вып.16. С.349-352.*
- [3] Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов // *Л.: - Энергоиздат, 1981. - 200с.*
- [4] Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т., Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов. // *Електротехніка і електромеханіка. Харків. 2004, №2, с.80-84.*

## РАСЧЕТ ДОПУСКОВ РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Петков А.А., к.т.н., с.н.с.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

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

тел./факс (057) 707-62-80, E-mail: alexp@kpi.kharkov.ua

*У роботі розглянуто вибір допусків елементів розрядного кола випробувального пристрою по відомим допускам на контрольовані параметри імпульсу струму. Наведено співвідношення й розглянута методика розрахунків допусків.*

*В работе рассмотрен выбор допусков элементов разрядной цепи по известным допускам на контролируемые параметры импульса тока. Приведены соотношения и рассмотрена методика расчетов допусков.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Все электротехническое оборудование, применяемое в системах энергогенерирования и электропередачи, в обязательном порядке подвергается испытаниям на устойчивость к воздействию импульсных электромагнитных факторов, сопровождающих их эксплуатацию. Наиболее часто испытания такого рода проводятся с использованием высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ), создаваемых на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). ВИИУ формируют нормированные нормативными документами импульсные воздействия (импульсы тока, напряжения, электромагнитного поля или его составляющие), что накладывает достаточно жесткие требования на процесс проектирования ВИИУ и, в частности, на выбор допусков элементов разрядных цепей, которые определяют нормируемые параметры создаваемого импульсного воздействия.

**Анализ публикаций.** Вопросы выбора допусков являются вторым этапом параметрического синтеза разрядной цепи ВИИУ [1]. В общем случае математическая модель набора допусков параметров элементов разрядной цепи имеет вид

$$\overline{D_E} = \Phi(\overline{P_E}, \overline{P_{IV}}, \overline{P_N}, \overline{D_{IV}}, \overline{D_N}), \quad (1)$$

где  $\overline{D_E}$ ,  $\overline{D_{IV}}$ ,  $\overline{D_N}$  – соответственно наборы допусков параметров элементов разрядной цепи, импульсного воздействия и нагрузки;  $\overline{P_E}$ ,  $\overline{P_{IV}}$ ,  $\overline{P_N}$  – соответственно наборы параметров элементов разрядной цепи, импульсного воздействия и нагрузки;  $\Phi(\cdot)$  – оператор, определяемый конкретным видом схемы ВИИУ.

Согласно теории погрешностей вычислений [2], относительное отклонение положительной функции нескольких аргументов  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  при достаточной малом их отклонении, определяется из соотношения:

$$\delta_y = \sum_{k=1}^n \frac{x_k}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \cdot \left| \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_k} \right| \cdot \delta_{x_k}, \quad (2)$$

где  $\delta_y$  – относительное отклонение функции;  $\delta_{x_k}$  – относительное отклонение  $k$ -го аргумента;  $x_k$  – значение  $k$ -го аргумента, при котором оценивается от-

клонение функции;  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – значение функции, вычисляемое в точке  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;  $\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_k}$  – частная производная по  $x_k$ , вычисляемая в точке  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Теоретически, использование (1) и элементов теории чувствительности электронных схем [3] позволяет в первом приближении рассчитать допуски контролируемых параметров импульсного воздействия [4, 5] по известным допускам параметров элементов разрядной цепи. Однако, в настоящий момент, отсутствуют какие-либо соотношения, позволяющие производить практические расчеты для конкретных схемных решений ВИИУ [1].

**Целью** настоящей работы является вывод соотношений и разработка методики, позволяющих проводить расчеты допусков разрядных цепей одноконтурных высоковольтных импульсных испытательных устройств.

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим эквивалентную схему одноконтурного ВИИУ, представленную на рис. 1. Из материалов, приведенных в [4, 5], контролируемые параметры импульса тока, формируемого в такой схеме, определяются из соотношений:

$$T_{H(0,1;0,9)} = \tau_{H(0,1;0,9)} \cdot \sqrt{L \cdot C}; \quad (3)$$

$$T_{C0,5} = \tau_{C0,5} \cdot \sqrt{L \cdot C}; \quad (4)$$

$$i_{\max} = I_{\max} \cdot \frac{U_C(0)}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \quad (5)$$

где  $i_{\max}$  – максимальное значение импульса тока;  $T_{H(0,1;0,9)}$  – время нарастания значений импульса тока от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения;  $T_{C0,5}$  – время достижения на спаде уровня 0,5 от максимального значения;  $I_{\max}$ ,  $\tau_{H(0,1;0,9)}$ ,  $\tau_{C0,5}$  – безразмерные параметры – аналоги именованных параметров  $i_{\max}$ ,  $T_{H(0,1;0,9)}$ ,  $T_{C0,5}$ .

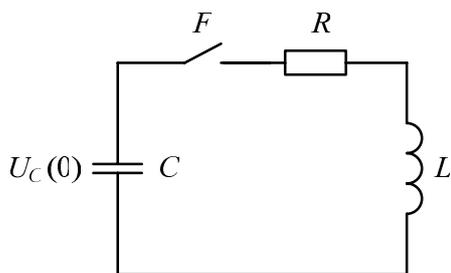


Рис. 1. Эквивалентная схема разряда ВИИУ.  
 $U_C(0)$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $R$  – зарядное напряжение конденсатора, емкость конденсатора, индуктивность разрядной цепи, активное сопротивление разрядной цепи;  
 $F$  – коммутатор

Используя методику, изложенную в [4], можно показать, что для вычисления безразмерных параметров импульса тока при  $2 \leq r \leq 30$  имеют место следующие соотношения:

$$\tau_{H(0,1;0,9)} = A_1 \cdot r^{B_1}; \quad (6)$$

$$\tau_{C0,5} = A_2 \cdot r + B_2; \quad (7)$$

$$I_{\max} = A_3 \cdot r^{B_3}, \quad (8)$$

где  $A_1 = 1,065$ ;  $B_1 = -0,7689$ ;  $A_2 = 0,6575$ ;  $B_2 = 1,0924$ ;  $A_3 = 0,7252$ ;  $B_3 = -0,8943$ .

Тогда на основании (2), используя соотношения (3) – (8) и предполагая достаточную малость относительных отклонений параметров элементов разрядной цепи, можно вывести следующие соотношения для определения относительных отклонений контролируемых параметров импульсов тока:

$$\delta_{T_{H(0,1;0,9)}} = a_{1,1} \cdot \delta_R + a_{1,2} \cdot \delta_L + a_{1,3} \cdot \delta_C; \quad (9)$$

$$\delta_{T_{C0,5}} = a_{2,1} \cdot \delta_R + a_{2,2} \cdot \delta_L + a_{2,3} \cdot \delta_C; \quad (10)$$

$$\delta_{i_{\max}} = a_{3,1} \cdot \delta_R + a_{3,2} \cdot \delta_L + a_{3,3} \cdot \delta_C + \delta_{U_C(0)}, \quad (11)$$

где  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}$ ,  $\delta_{T_{C0,5}}$ ,  $\delta_{i_{\max}}$  – соответственно относительные допуски длительности нарастания, длительности спада и максимального значения тока;  $\delta_{U_C(0)}$ ,  $\delta_R$ ,  $\delta_L$ ,  $\delta_C$  – соответственно относительные допуски на зарядное напряжение, активное сопротивление, индуктивность и емкость; коэффициенты  $a_{ij}$  равны:

$$a_{1,1} = |B_1|; \quad a_{1,2} = 0,5 \cdot |1 - B_1|; \quad a_{1,3} = 0,5 \cdot |1 + B_1|;$$

$$a_{2,1} = \frac{|A_2 \cdot R \cdot C|}{A_2 \cdot R \cdot C + B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}};$$

$$a_{2,2} = 0,5 \frac{|B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}|}{A_2 \cdot R \cdot C + B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}};$$

$$a_{2,3} = \frac{|A_2 \cdot R \cdot C + 0,5 \cdot B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}|}{A_2 \cdot R \cdot C + B_2 \cdot L^{0,5} \cdot C^{0,5}};$$

$$a_{3,1} = |B_3|; \quad a_{3,2} = 0,5 \cdot |1 + B_3|; \quad a_{3,3} = 0,5 \cdot |1 + B_3|.$$

Соотношения (9) – (11) выведены в предположении малости  $\delta_{U_C(0)}$ ,  $\delta_R$ ,  $\delta_L$ ,  $\delta_C$ . Произведем некоторую оценку применимости этих соотношений.

На рис. 2 показаны результаты вычисления допуска  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}$  по формуле (9) (кривая 1) и путем

непосредственного расчета (кривая 2) с использованием всех возможных комбинаций отклонений  $U_C(0)$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $C$  (предполагалось, что  $\delta_x = \delta_{U_C(0)} = \delta_R = \delta_L = \delta_C$ ).

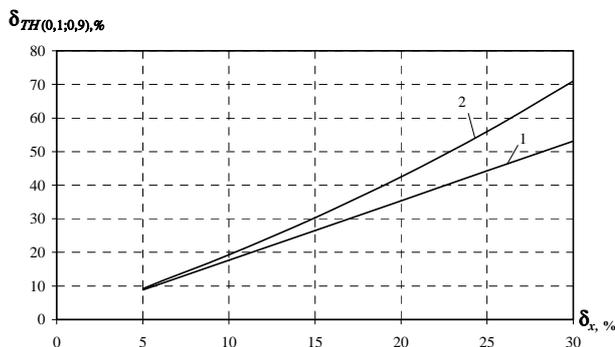


Рис. 2. Зависимость допусков в разрядной цепи

Как видно из рисунка при больших допусках  $\delta_x > 15\%$  на параметры элементов разрядной цепи допуск на контролируемый параметр импульса тока  $T_{H(0,1;0,9)}$ , полученный непосредственным расчетом, может значительно отличаться от допуска, вычисленного по (9).

В дальнейшем для решения задачи выбора допусков элементов разрядной цепи примем, что допуски определяются по соотношениям (9) – (11). Учитывая, что определению подлежат четыре параметра  $\delta_{U_C(0)}$ ,  $\delta_R$ ,  $\delta_L$ ,  $\delta_C$ , а имеется только три уравнения связи между ними (9) – (11), то поставленная задача не имеет однозначного решения, что вызывает необходимость привлечения аппарата математического программирования [6]. В общем случае допуски элементов разрядной цепи могут быть определены из решения следующей задачи оптимизации.

Для заданных значений величин элементов разрядной цепи  $U_C(0)$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , изменяя их допуски  $\delta_{U_C(0)}$ ,  $\delta_R$ ,  $\delta_L$ ,  $\delta_C$ , требуется найти минимум целевой функции

$$F = \left| \delta_{i_{\max}}^* - f(\cdot) \right|, \quad (12)$$

при следующих ограничениях на:

допуски параметров импульса тока

$$\begin{cases} a_{1,1} \delta_R + a_{1,2} \delta_L + a_{1,3} \delta_C \leq \delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^*; \\ a_{2,1} \delta_R + a_{2,2} \delta_L + a_{2,3} \delta_C \leq \delta_{T_{C0,5}}^*; \\ a_{3,1} \delta_R + a_{3,2} \delta_L + a_{3,3} \delta_C + \delta_{U_C(0)} \leq \delta_{i_{\max}}^*, \end{cases} \quad (13)$$

и допуски параметров элементов разрядной цепи:

$$\delta_R \geq \delta_R^*; \quad \delta_L \geq \delta_L^*; \quad \delta_C \geq \delta_C^*; \quad \delta_{U_C(0)} \geq \delta_{U_C(0)}^*, \quad (14)$$

где  $f(\cdot)$  – функция, представляющая собой правую часть выражения (11);  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^*$ ,  $\delta_{T_{C0,5}}^*$ ,  $\delta_{i_{\max}}^*$  – заданные предельные (максимальные) допуски контролируемых параметров импульса тока;  $\delta_{U_C(0)}^*$ ,  $\delta_R^*$ ,  $\delta_L^*$ ,  $\delta_C^*$  – предельные (минимальные) значения допусков

параметров элементов разрядной цепи, определяемые элементной базой.

Решение данной задачи может быть проведено одним из методов линейного программирования [6]. Достаточно просто поставленная задача может быть решена с использованием команды "Поиск решения" из пакета Excel [7]. Например, при  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 20\%$ ,  $\delta_{T_{C0,5}}^* = 20\%$ ,  $\delta_{i_{\max}}^* = 10\%$ , ([8]) и  $\delta_{U_C(0)}^* = 4\%$ ,  $\delta_R^* = 5\%$ ,  $\delta_L^* = 10\%$ ,  $\delta_C^* = 10\%$ . найдено решение (при значении целевой функции  $F = 0$ ) вида:  $\delta_{U_C(0)} = 4,26\%$ ;  $\delta_R = 5,23\%$ ;  $\delta_L = 10,01\%$ ;  $\delta_C = 10,01\%$ . Рассчитанные допуски параметров элементов разрядной цепи могут быть реализованы имеющейся элементной базой [9, 10].

Однако, в общем случае, использование методов оптимизации имеет ряд вычислительных сложностей, а также сложностей интерпретации результатов (при значении целевой функции  $F \neq 0$ ), что предопределяет интерес к формулированию и решению детерминированной задачи.

Величина допуска зарядного напряжения  $\delta_{U_C(0)}$  обычно определяется погрешностью системы измерений и автоматики и, с учетом уровня современной элементной базы и технических решений, может быть достаточно малым, наперед заданным значением. Тогда при фиксированных  $R, L, C$  и априори заданных значениях  $\delta_{U_C(0)}, \delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^*, \delta_{T_{C0,5}}^*, \delta_{i_{\max}}^*$ , допуски на параметры элементов разрядной цепи  $\delta_R, \delta_L, \delta_C$ , можно определить из решения системы трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} a_{1,1} \cdot \delta_R + a_{1,2} \cdot \delta_L + a_{1,3} \cdot \delta_C = \delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^*; \\ a_{2,1} \cdot \delta_R + a_{2,2} \cdot \delta_L + a_{2,3} \cdot \delta_C = \delta_{T_{C0,5}}^*; \\ a_{3,1} \cdot \delta_R + a_{3,2} \cdot \delta_L + a_{3,3} \cdot \delta_C = \delta_{i_{\max}}^* - \delta_{U_C(0)}. \end{cases} \quad (15)$$

Решение системы (15) производится одним из методов, приведенных в [2], и позволяет определить величины допусков на входные параметры. Так, например, при  $R = 10 \text{ Ом}$ ,  $L = 2 \text{ мкГн}$ ,  $C = 3 \text{ мкФ}$  ( $r = 12,5$ ) и допусках на параметры импульса тока и зарядное напряжение  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 20\%$ ,  $\delta_{T_{C0,5}}^* = 20\%$ ,  $\delta_{i_{\max}}^* = 10\%$ ,  $\delta_{U_C(0)} = 2\%$ , из решения (15) допуски на параметры элементов разрядной цепи определяются как:  $\delta_R = 7,44\%$ ;  $\delta_L = 12,83\%$ ;  $\delta_C = 12,67\%$ . Если вычисленные допуски превышают реальные допуски имеющейся элементной базы, то, в силу положительности коэффициентов  $a_{i,j}$ , реальные значения допусков на параметры импульса тока уменьшаются. Например, при  $\delta_R = 5\%$ ;  $\delta_L = 10\%$ ;  $\delta_C = 10\%$ , значения допусков, вычисленных по (9) – (11) составят:  $\delta_{T_{H(0,1;0,9)}} = 15\%$ ,  $\delta_{T_{C0,5}} = 15\%$ ,  $\delta_{i_{\max}} = 7,5\%$ , что меньше заданных значений.

Расчеты, проведенные с использованием (15) показывают, что для  $2 \leq r \leq 30$  допуски на параметры импульса тока зависят только от  $r$  и не зависят от конкретных значений  $R, L, C$ .

Это позволяет проанализировать взаимосвязь допусков элементов разрядной цепи для различных наборов допусков контролируемых параметров импульса, имеющих место на практике. Графики, отражающие такую связь, приведены на рис. 3 – рис. 5.

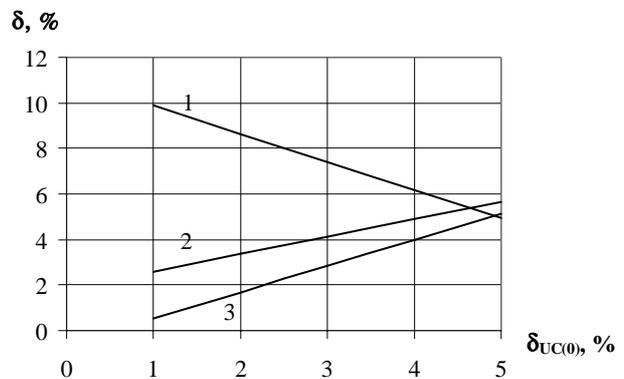


Рис. 3. Зависимость допусков в разрядной цепи для набора допусков параметров импульса вида:

$$\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 10\%, \delta_{T_{C0,5}}^* = 10\%, \delta_{i_{\max}}^* = 10\% \quad ([11]).$$

1 –  $\delta_R$ , 2 –  $\delta_L$ , 3 –  $\delta_C$

Задаваясь значением допуска на зарядное напряжение  $\delta_{U_C(0)}$ , по графикам определяем допуски параметров остальных элементов разрядной цепи для конкретного набора допусков параметров импульса тока.

Выбранные по рис. 3 – рис. 5 допуски, могут быть уменьшены (если позволяет используемая элементная база), что, как отмечалось выше, приведет к уменьшению разброса значений контролируемых параметров импульса. Однако на практике возможна и противоположная ситуация.

Так, например, допуски на емкость высоковольтных импульсных конденсаторов, используемых в разрядных цепях ВИИУ, обычно составляют 10% [11], что, как видно из рисунков, не всегда обеспечивает требуемые значения допусков параметров импульса. В этом случае необходим отбор конденсаторов при входном контроле или включение дополнительных элементов и коммутирующих устройств, позволяющие производить регулирование параметров элементов разрядной цепи.

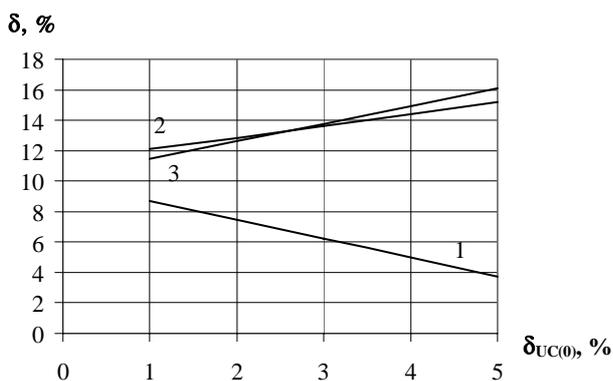


Рис. 4. Зависимость допусков в разрядной цепи для набора допусков параметров импульса вида:

$$\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 20\%, \delta_{T_{C0,5}}^* = 20\%, \delta_{i_{\max}}^* = 10\% \quad ([8]).$$

$$1 - \delta_R, 2 - \delta_L, 3 - \delta_C$$

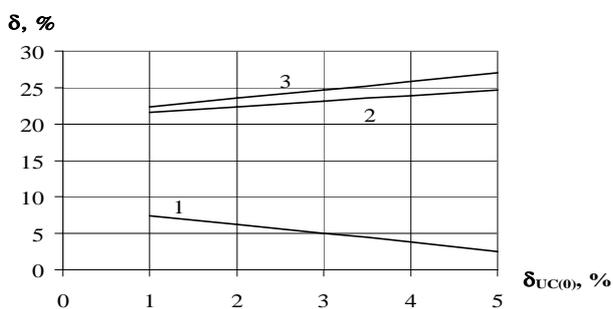


Рис. 5. Зависимость допусков в разрядной цепи для набора допусков параметров импульса вида:

$$\delta_{T_{H(0,1;0,9)}}^* = 30\%, \delta_{T_{C0,5}}^* = 30\%, \delta_{i_{\max}}^* = 10\% \quad ([12]).$$

$$1 - \delta_R, 2 - \delta_L, 3 - \delta_C$$

### ВЫВОДЫ

1. Приведены зависимости для определения контролируемых параметров импульса тока по известным параметрам элементов разрядной цепи одноконтурного высоковольтного импульсного испытательного устройства.

2. Выведены соотношения для определения допусков контролируемых параметров импульса тока.

3. Сформулирована задача выбора допусков элементов разрядной цепи в виде задачи оптимизации, описаны варианты ее решения.

4. Исследована взаимосвязь допусков параметров элементов разрядной цепи для характерных наборов допусков параметров импульса тока.

Приведенные материалы могут быть использованы для анализа допусков ВИИУ с другими схемными решениями их разрядных цепей.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтных импульсных испытательных устройств // Труды 12-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии" (7-8 июня 2006 года г. Харьков). – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2006. – С. 224 – 226.
- [2] Копченова Н.В., Марон И.А. Вычислительная математика в примерах и задачах. – М.: Наука, 1972. – 367 с
- [3] Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1973. – 200 с.
- [4] Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехника та електроенергетика. - 2005. - №1. – С. 65 - 69.
- [5] Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств при различных способах задания контролируемых параметров испытательных импульсов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПИ". - №17. – 2006. – С. 105 – 111.
- [6] Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
- [7] Коттингхэм М. Excel 2000: руководство разработчика. – К.: Издательская группа ВHV, 2000. – 704 с.
- [8] ГОСТ Р 50932-96 Устойчивость оборудования проводной связи к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1996. – 15 с.
- [9] Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник / Н.Н. Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренко. – Мн.: Беларусь, 1994. – 591 с.
- [10] Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н. и др. / Под ред. Г.С. Кучинского - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 656 с.
- [11] ГОСТ 16357-83 Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1983. – 40 с.
- [12] ГОСТ Р 50649-94 Устойчивость к импульсному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1994. – 20 с.

Поступила 14.05.2008

## НАМИТОВ КЕМАЛЬ КАДЫРОВИЧ

(к 85-летию со дня рождения)

В этом году исполнилась 85 лет Кемалю Кадировичу Намитову – заслуженному деятелю науки, доктору технических наук, профессору.

К.К. Намитов известен в Украине и за рубежом как крупный ученый, талантливый инженер и изобретатель, видный педагог высшей школы. Он является автором более 300 опубликованных работ (в том числе 25 книг и брошюр), около 500 изобретений. Под его руководством выполнено более 60 кандидатских и докторских диссертаций. Около 40 лет он входит в состав ряда специализированных ученых советов, 10 лет был председателем одного из них. Признанием его авторитета как ученого является введение его в состав ученого совета Московского энергетического института, ряда других ученых советов, привлечение его к экспертизе диссертационных работ.

Начало инженерной деятельности К.К. Намитова относится к периоду послевоенного восстановления электротехнической промышленности Украины. В 1951 году, после окончания физико-математического Ростовского Госуниверситета, он был направлен на одно из ведущих предприятий электротехнической промышленности – Харьковский электромеханический завод (ХЭМЗ). Здесь он прошел большой производственный путь от инженера до начальника лаборатории, нашел применение своих знаний в решении актуальных инженерно-технических задач, представляющих интерес не только для завода, но и для всей отрасли. Эти проблемы касались разнообразных вопросов расчета, конструирования, технологии производства электрических машин и аппаратов, применения новых материалов, внедрения неразрушающих методов контроля, разработки электрофизических методов обработки и электротехнологических процессов, приборов контроля качества изделий и др. Им разработаны оригинальные методики и приборы для исследования коллекторно-щеточного аппарата машин постоянного тока, исследования осевых усилий на подпятниках вертикальных электродвигателей (электробуров и электронасосов), оптимизации усилий опрессовки статоров и роторов электрических машин, усилий резания металлов. Им внедрены в производственную практику ультразвуковые, гамма и рентгенографические методы обнаружения объемных дефектов, люминесцентные и магнитопорошковые методы контроля поверхностных дефектов, рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализы и др.

В 1959 году К.К. Намитов в составе рабочей группы участвует в определении направлений деятельности созданного при заводе ХЭМЗ научно-исследовательского института НИИЭЛЕКТРО (впоследствии преобразованного во ВНИИЭлектроаппарат), куда он вскоре переводится и возглавляет последовательно физико-техническую лабораторию, отдел проблемных разработок и затем отделение института. Его деятельность сыг-



рали существенную роль в становлении ВНИИЭлектроаппарат, как ведущего научного центра СССР по низковольтному электроаппаратостроению. К числу фундаментальных работ выполненных им в этот период следует отнести исследование процессов формирования

низковольтных электрических разрядов при ультрамикронных промежутках, явлений массопереноса в контактно-дугогасительных системах аппаратов, решение ряда физико-технических проблем электроэрозионных явлений и их приложений в технике, анализ электродинамических сил в аппаратах, характера распределения тока в зонах скачков сечений проводников и др. Кроме того, К.К. Намитовым был выполнен ряд работ, которые носят непосредственно практический характер. Им было предложено и реализовано множество оригинальных и высокоэффективных инженерных решений по созданию вакуумных контакторов, автоматических выключателей, предохранителей и других аппаратов, разработаны методы расчета и испытаний низковольтных аппаратов.

В этот период К.К. Намитов активно участвует в разработке и реализации ряда научно-технических программ по сотрудничеству с зарубежными странами в рамках СЭВ. Он являлся руководителем научных программ, возглавлял делегации на международных встречах, выступал как эксперт по ряду крупных проектов.

Инженерная деятельность К.К. Намитова была всегда связана с педагогической работой. Работая на заводе ХЭМЗ, он руководит практикой и дипломными работами студентов Харьковского и Киевского госуниверситетов, Харьковского политехнического института, преподает в ряде высших учебных заведений. С 1973 г. его научная и педагогическая деятельность неразрывно связана с Харьковским институтом инженеров коммунального строительства, преобразованным впоследствии в Харьковскую национальную академию городского хозяйства, где он много лет возглавлял кафедру светотехники и источников света.

На протяжении многолетней плодотворной научной деятельности К.К. Намитов оказал заметное влияние на формирование ряда направлений в области электрофизики, электротехнологий, электроаппаратостроения, светотехники, внося выдающийся вклад в развитие инженерной науки.

К.К. Намитов – участник боевых действий во время Великой отечественной войны, он награжден многими боевыми и трудовыми орденами и медалями, дипломами и грамотами.

Друзья, коллеги, многочисленные ученики желают юбиляру доброго здоровья, сохранения на долгие годы присущей ему энергии и творческой активности.

Редколлегия журнала "Электротехника и Электро-механика" присоединяется к этим пожеланиям.

## Список авторів

<b>А</b>	<b>М</b>
Афанасьева Ирина Олеговна ..... 10	Маджид Бижар ..... 60
	Макогон Сергій Андрійович ..... 33
	Милых Владимир Иванович..... 36
<b>Б</b>	<b>Н</b>
Баранов Михаил Иванович ..... 5, 51	Набокова Ольга Владимировна ..... 10
Батыгин Юрий Викторович ..... 60, 64	
Безотосный Владимир Федорович ..... 10	
<b>В</b>	<b>П</b>
Власенко Эдуард Владимирович..... 10	Петков Александр Александрович ..... 68
<b>Г</b>	<b>Р</b>
Гетьман Андрей Владимирович ..... 44	Радимов Игорь Николаевич ..... 40
Гречко Александр Михайлович ..... 14	Рымша Виталий Викторович..... 40
Гулый Михаил Викторович ..... 40	
<b>Е</b>	<b>С</b>
Емельянов Вадим Леонидович ..... 10	Сериков Георгий Сергеевич ..... 60
<b>Ж</b>	<b>Т</b>
Жемеров Георгий.Георгиевич ..... 19	Ткаченко Сергей Валериевич ..... 36
<b>К</b>	<b>Ч</b>
Канов Лев Николаевич ..... 47	Чан Тхи Тху Хыонг ..... 40
Клименко Борис Владимирович..... 26	Чаплыгин Евгений Александрович ..... 64
Козлов Владимир Владимирович..... 10	Черногор Татьяна Тимофеевна ..... 64
Колесник Виктор Юрьевич..... 19	

# Abstracts

## **ELECTRO ENGINEERING: Prominent events and great names**

*Baranov M.I.*

**Radio electronics: short history of its formation as the thematic applied-physics field of both electricity and scientific-and-technological advance of the humanity.**

The paper presents a brief review of the basic achievements of the humanity in the field of generation, transmission, reception and amplification

5 of high-frequency electromagnetic vibrations in micrometer-meter ranges of wavelengths related to such an advanced branch of science and technology as radio electronics.

*Key words* – **radio electronics, high-frequency electromagnetic vibrations, radio wave, generation, transmission, reception, amplification.**

## **Electrical Mashines and Apparatus**

*Bezotosniy V.F., Vlasenko EV, .Kozlov V.V., Afanaseva I.O., Nabokova O.V., Emeljanov V.L.*

**Some actual directions of nondestructive control of material properties by electromagnetic methods.**

Problems of control of non-electrical and electrical parameters of materials by electromagnetic methods are considered in this article. An automated nondestructive control system for mechanical stresses in electronics elements is introduced.

*Key words* – **control of non-electrical parameters, nondestructive control, mechanical stresses.**

*Grechko A.M.*

**Dynamic characteristics of an electromagnet with a single-position magnetic latch.**

Dynamic characteristics of an electromagnetic drive with a single-position magnetic latch for medium-voltage vacuum circuit breaker are studied.

*Key words* – **electromagnetic drive, single-position magnetic latch, dynamic characteristics.**

*Zhemerov G.G., Kolesnik V.J.*

**Analysis of processes in an active rectifier - current source in asynchronous machines starting system.**

Application of an active rectifier - current source in the starting system of asynchronous machines on the basis of a current source inverter is considered in the article. Expressions for determination of voltages and currents in the network filter of the active rectifier – current source elements are obtained. Output voltage waveform of the active rectifier is analyzed.

*Key words* – **active rectifier - current source, current source inverter, network filter.**

*Klymenko B.V.*

**Electrical and magnetic devices: terminology of International Electrical Dictionary.**

The paper considers a number of problems concerning introduction of terms and definitions from International Electrical Dictionary (IED). We

10 begin publishing a nonofficial translation of an IED part, namely, *part 151 - Electrical and magnetic devices*, with the author's comments and explanations.

*Key words* – **International Electrical Dictionary terminology introduction, nonofficial translation.**

*Makogon S.A.*

**Simulation of unidirectional magnetic forces in a coaxial-linear synchronous vibrator with an asymmetrically positioned armature.**

Unidirectional magnetic forces and traction characteristics for a coaxial-linear synchronous vibrator with a toothed and toothless stator are analysed by a finite element method.

*Key words* – **FEM, linear vibrator, magnetic forces.**

*Milykh V.I., Tkachenko S.V.*

**Force interactions in a linear electric motor for seismic vibrations sources.**

Force interactions in a linear pulse electrodynamic motor for sources of seismic vibrations are considered. The motor differs in its cylindrical electromagnetic system and its strong magnetic saturation. Contribution of electrodynamic and magnetic constituents to the total traction force is revealed. Force behavior as function of the relative position of the armature and the reactor as well as mmf of their windings is specified.

*Key words* – **pulse electrodynamic electric motor, seismic vibrations, force interactions.**

*Radimov I.N., Guliy M.V., Rimsha V.V., Tran Thi Thu Huong*

**Parameters of a brushless DC motor with permanent magnets.**

Calculation and identification of parameters of a brushless DC motor with permanent magnets are presented.

*Key words* – **brushless DC motor, magnetic field, parameters, inductance.**

33

36

40

26

Getman A.V.

**Universal selected contours of a measuring system of varied space harmonics of a magnetic field.**

The practical aspects of a spatial harmonic analysis are investigated with the purpose of approach to a surface technical objects of area, accessible to analytical description of an exterior magnetic field. The spatial configuration of systems contours of measuring spherical and spheroid harmonics of a magnetic field is theoretically justified. The procedure of application contour measuring systems for definition amplitude coefficients of varied harmonics of scalar magnetic potential is extended.

*Key words* – magnetic field, spatial harmonics, magnetic potential, spherical harmonic analysis.

44

Kanov L.N.

47

**Construction and feature study of ferroresonant circuits on the basis of a circuit modeling method.**

Circuit models of the main single-line and nonlinear electrical elements in the stationary mode of alternating current are introduced, the models utilized to obtain a circuit model of a ferroresonant circuit. A technique for constructing the circuit voltage-current and amplitude-frequency characteristics as well as specifying limits of stable modes is developed.

*Key words* – resistance, inductance, operated source, voltage-current and amplitude-frequency characteristics, circuit model, slowly changing amplitudes, stability.

## High Electrical and Magnetic Field Engineering

Baranov M.I.

**A ball lightning, a powerful natural molecular integrator of atmospheric electricity. A new hypothesis of the origin and a theory of the electrophysical phenomenon.**

A new physical and mathematical model and a new hypothesis of a probable origin, formation and existence in the air atmosphere of such a natural phenomenon as a ball lightning (BL) are introduced, based on electric dipoles of water microparticles (molecules) and their electrostatic coupling with the negatively charged nucleus of lightning. Analytical estimations of possible levels of the strength of ultrahigh electric field inside and outside of the BL active spherical zone, as well as electric potentials, density, and absolute indices of electric energy accumulated by BL are executed.

*Key words* – ball lightning, physical and mathematical model, origin, formation and existence, analytical estimations.

Batygin Yu.V., Bizhar Magid, Serikov G.S.

**Experimental investigation of inductor systems for angled bend forming on sheet work-pieces.**

Conducted experimental investigations of inductor systems for angled bend forming on sheet work-pieces has confirmed theoretical results reliability and, correspondingly, practical workability of inductor system designs developed for performing the given technological operation. Allowance for finite lateral size has shown that the real width of current-conductors essentially decreases magnitudes of excited fields and pressures. Thus, changing a point model to a strip one gives decreasing the magnetic field intensity by maximum ~ 33% and pressures ~ 89%.

51

*Key words* – experimental investigations, inductor systems, angled bend forming, sheet work-pieces.

Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Chernogor T.T.

64

**Experiments with induction inductor systems for magnetic pulse attraction of sheet metals.**

In the present work, a constructive solution for increasing magnetic pulse attraction efficiency in induction inductor systems is suggested. The technical essence of the suggestion consists in specifying a geometrical shape of an additional screen what permits decreasing a distance between interacting subjects. Testing an experimental model has shown its practical workability.

*Key words* – induction inductor system, inductor, auxiliary screen, work instrument.

Petkov A.A.

68

**Calculations of tolerance of high-voltage test device digit circuits.**

In the work, selection of tolerance of test device digit circuit's elements under known tolerance for controllable parameters of a current pulse is considered. Relationships are presented, a tolerance calculation technique introduced.

*Key words* – pulse, digit circuits, tolerance, test device, controlled parameters.

60

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У 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 анотацій українською мовою, до 5 рядків (для громадян України).*

*Текст анотацій 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 форматуванням.

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.

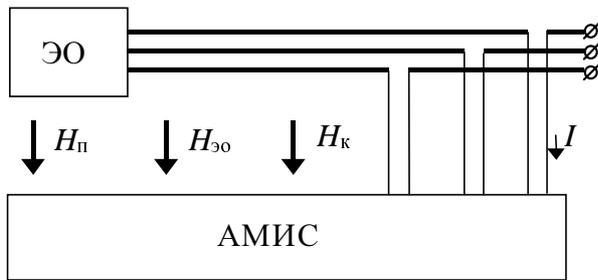


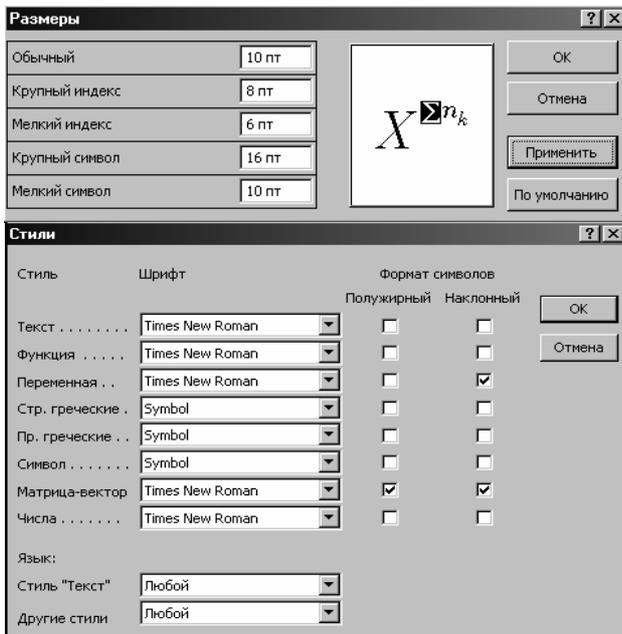
Рис.1. Функціональна схема пристрою

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 помехоносущих 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 феромагнітного 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 03.07.2009

або

Надійшла 03.07.2009

Матеріали приймаються за адресою:

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

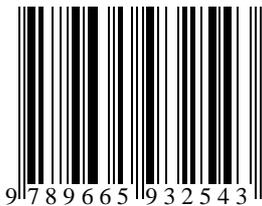
Електронні варіанти матеріалів по E-mail: [kbv@kpi.kharkov.ua](mailto:kbv@kpi.kharkov.ua) [eie@kpi.kharkov.ua](mailto:eie@kpi.kharkov.ua)

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*  
**2008'6**

ISBN 966-593-254-3



Технічне редагування:

Смельянов Вадим Леонідович

т. (057)707-69-76

E-mail: evl@kpi.kharkov.ua

Секретар редакції:

Злуніцина Наталя Ростиславівна

т. (057)707-62-81

E-mail: seb@kpi.kharkov.ua

Підписано до друку 04.12.2008 р.

Формат 60 × 90 1/8. Папір Prima Copy

Друк - офсетний. Ум. друк. арк. 9,5.

Наклад 300 прим. 1-й завод - 140. Зам. № . Ціна договірна.

---

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

---

КП Друкарня №13. 61002, Харків, вул. Артема, 44

---