



## **ЗМІСТ**

### **Електротехніка. Визначні події. Славенні імена**

<b>Баранов М.И.</b>	Электроны и земная цивилизация	<b>3</b>
---------------------	--------------------------------	----------

### **Електричні машини та апарати**

<b>Байда Е.И.</b>	Математическое моделирование индукционно-динамических систем	<b>13</b>
<b>Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Шукин И.С.</b>	Экспериментальные и теоретические исследования ударного электромеханического преобразователя индукционного типа с различными индукторами	<b>17</b>
<b>Кохановський В.О.</b>	Дослідження електроерозійної стійкості контакт-деталей з підвищеною екологічною безпеністю	<b>25</b>
<b>Милых В.И., Майстренко А.М.</b>	Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя для исследовательского виртуального стенда и ее практическая реализация	<b>28</b>
<b>Шинкаренко В.Ф., Загирняк М.В., Шведчикова И.А.</b>	Макрогенетический анализ и ранговая структура систематики магнитных сепараторов	<b>33</b>

### **Теоретична електротехніка**

<b>Шульженко Н.Г., Пантелят М.Г., Руденко Е.К., Сафонов А.Н.</b>	Расчёт трёхмерных стационарных магнитных полей методом конечных элементов	<b>40</b>
------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------	-----------

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

<b>Баранов М.И.</b>	Оценка электроэрозионного износа массивных однородных металлических электродов высоковольтных сильноточных искровых воздушных коммутаторов атмосферного давления	<b>44</b>
<b>Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М.</b>	Развитие представлений о механизмах срабатывания тригатронов и их рациональной конструкции (обзор)	<b>49</b>
<b>Бондина Н.Н., Михайлов В.М.</b>	Приближение импульсной проводимости системы тонкий соленоид – внешняя проводящая оболочка	<b>56</b>
<b>Гнатов А.В.</b>	Расчет электромагнитных процессов в индукционной индукторной системе с массивным экраном конечной толщины	<b>59</b>
<b>Петков А.А.</b>	Формирование испытательного импульса напряжения на емкостной нагрузке	<b>63</b>

## Електричний транспорт

Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Оверьянова Л.В., Емельянов В.Л.	Имитационная модель тягового вентиляно-индукторного электропривода	67
<b>Abstracts</b>		73

### 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. Зараз триває процес перереєстрації журналу як фахового.

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.

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

Електронна копія журналу «Електротехніка і Електромеханіка», який зареєстровано у Міжнародній системі реєстрації серійних (періодичних) видань під стандартизованим кодом ISSN 2074-272X, надсилається до Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського.

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

**ЭЛЕКТРОНЫ И ЗЕМНАЯ ЦИВИЛИЗАЦИЯ**

*З науково-технічних та історичних позицій показано фундаментальну роль елементарних носіїв електричного заряду – електронів в утворенні і розвитку земної цивілізації.*

*С научно-технических и исторических позиций показана фундаментальная роль элементарных носителей электрического заряда – электронов в образовании и развитии земной цивилизации.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Все мы прекрасно понимаем важную и определяющую роль представителей микромира для нашего макромира. Все свойства и физические проявления любого вещества определяются его внутренним микроустройством, где "верховенствуют" волновые свойства огромного числа микрочастиц и "царят" вероятностные события, описываемые законами квантовой физики. Одними из важнейших представителей таких микрочастиц для земного мира оказались электроны. Согласно [1] термин "электрон" происходит от древнегреческого слова "ēlektron", корень которого "ēlektēr" обозначает "янтарь", то есть физическое тело "смоляной" природы, которое обладает свойством электризации и способностью выработки при соответствующем внешнем силовом воздействии на него на своей поверхности электрического заряда. То, что такой заряд является отрицательным, человечество узнало сравнительно недавно – только в 19-ом столетии после открытия в 1897 году выдающимся английским физиком Джозефом Томсоном рассматриваемой нами элементарной частицы вещества – электрона [2, 3]. Интересно отметить, что открыт электрон был при экспериментальном исследовании прохождения катодных лучей (электричества) через разряженные газы в стеклянных откакумированных электроразрядных трубках. За данное исследование и открытие Дж. Томсон в 1906 году был удостоен Нобелевской премии по физике. Этому определению рода заряда электрона поспособствовала и разработка в данный период основоположниками электричества физически верной теории электризации тел [3, 4]. Первоначально в первой половине 18-го века такое, как мы теперь знаем, отрицательное электричество, порождаемое "янтарем", ученые называли "смоляным", а положительное электричество, снимаемое с наэлектризованных стеклянных тел, – "стеклянным" [4].

Введение во второй половине 18-го столетия выдающимся американским физиком-самородком Бенджаминном Франклином в физику таких научных понятий как положительное (+) и отрицательное электричество (–) позволило людям облегчить свое восприятие электрически заряженных тел. Однако эти научные абстракции никак не способствовали раскрытию глубинных физических знаний об электрическом заряде, создающем вокруг себя такой вид физического поля как "электрическое поле". Именно через наличие данного электрического поля и проявляется электрический заряд микрочастицы или макрообъекта. Согласно [1] в современной физике под термином "элек-

трический заряд" понимается физическая величина, характеризующая силу взаимодействия элементарных частиц вещества и их систем с электромагнитным и, в частности, с электрическим полем. Истинность природных фундаментальных процессов, лежащих в основе формирования и появления в веществе электрического заряда, человечеству еще только предстоит узнать. Видимо, определенную ясность в данный фундаментальный вопрос должны внести будущие научные успехи человечества в области квантовой электродинамики, физики высоких энергий, ядерной физики и физики элементарных частиц.

Важно заметить, что величина электрического заряда электрона с точностью измерений до 1% была экспериментально установлена лишь в 1917 году выдающимся американским физиком Робертом Милликемом. Для этого потребовались годы кропотливой работы и оригинальные разработки (например, метода "милликемовского конденсатора") [3, 4]. Эта величина оказалась равной элементарному электрическому заряду – своего рода "кванту электричества", составляющему согласно современным уточненным измерениям  $e_0=1,602\cdot 10^{-19}$  Кл [2, 5]. О значимости этого результата говорит тот факт, что за данное научное исследование Р.Э. Милликену в 1923 году была присуждена Нобелевская премия по физике. В настоящее время факт существования в природе такого "атома электричества" считается твердо установленным. Гипотеза наличия в природе "кварков" – элементарных частиц с дробным по отношению к величине  $e_0$  зарядом, до сих пор экспериментально не подтверждена.

Укажем и то, что на сегодня, несмотря на колоссальные усилия физиков всего мира, размеры электрона пока точно не установлены [4]. Для случая приближения электрона в виде элементарной частицы – корпускулы сферической формы за его радиус  $r_e$  принимается величина, вытекающая из представлений классической электродинамики и примерно равная  $r_e = \mu_0 e_0^2 / (4\pi m_e) = 2,818 \cdot 10^{-15}$  м, где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная, а  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона [5, 6].

Изложению и определенной систематизации известных электрофизических фактов, проливающих свет на фундаментальную роль электронов в формировании и развитии нашей земной цивилизации, и посвящена данная статья, относящаяся, по мнению самого автора, к научно-популярной публицистике.

## 1. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В СТРОЕНИИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ВЕЩЕСТВА

Атом (молекула) является наименьшей частицей вещества, обладающей химическими свойствами того или иного химического элемента [2, 5]. В соответствии с основными упрощенными моделями устройства атома вещества, приближенно описывающими его состояние (физическое поведение) и предложенными в свое время выдающимся английским физиком Эрнстом Резерфордом (ядерно-планетарная модель атома, 1913 год) и выдающимся датским физиком Нильсом Бором (планетарно-квантовая модель атома, 1913 год), а также согласно современной уточненной квантовомеханической модели устройства атома любого вещества все атомы и образуемые ими молекулы в своем составе содержат размещенное в центральной области атомов положительно заряженное ядро с величиной заряда  $e_0 \cdot Z$  ( $Z$  – порядковый номер атома в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева), вокруг которого на некотором расстоянии в вакууме расположена отрицательно заряженная электронная оболочка сложной пространственной конфигурации с модулем заряда, также равным  $e_0 \cdot Z$  [3, 5]. В этой связи невозбужденный уединенный атом вещества является устойчивым электронейтральным материальным образованием. Вся атомная масса такого образования заключена практически в его ядре, обладающем массовым числом  $A$  и содержащем такие известные нам элементарные частицы как протоны  $p_e$  и нейтроны  $n_e$ . Напомним, что масса протона составляет  $m_p = 1836 m_e$ , а близкая ему масса нейтрона –  $m_n = 1839 m_e$  [2, 5]. Число протонов  $p_e$  в ядре атома точно равно его атомному порядковому номеру  $Z$ , а число нейтронов  $n_e$  в нем всегда составляет величину, равную  $N = A - Z$ . Поэтому в основе систематики известных землянам химических элементов лежит не их атомная масса или массовое число ядра их атомов  $A$  (как первоначально установил Д.И. Менделеев, 1869 год), а положительный электрический заряд ядра этих элементов, равный  $e_0 \cdot Z$  (как в дальнейшем уточнил Н. Бор, 1922 год) [3, 4].

Электроны, входящие в состав электронной оболочки атомов (или молекул, состоящих из атомов), получили название связанных. Связанные электроны атома вещества образуют электронные слои, имеющие по мере удаления от ядра атома следующие обозначения:  $K = 1$ ;  $L = 2$ ;  $M = 3$ ;  $N = 4$ ;  $O = 5$ ;  $P = 6$  [7, 8]. Каждый электронный слой представляет собой совокупность электронов, энергетические состояния которых определяются соответствующим одинаковым значением главного квантового числа  $n$  атома вещества. При этом для слоя  $K$  главное квантовое число  $n$ , наибольшее значение которого соответствует номеру периода элемента в системе химических элементов Д.И. Менделеева, которому рассматриваемый элемент принадлежит, принимает значение  $n = 1$ ; для слоя  $L - n = 2$ ; для слоя  $M - n = 3$ ; для слоя  $N - n = 4$ ; для слоя  $O - n = 5$ ; для слоя  $P - n = 6$  [2, 7]. Внутри каждого электронного слоя атома связанные электроны распределяются по электронным подоболочкам, каждая

из которых соответствует некоторому значению орбитального квантового числа  $l$  атома, равного  $l = n - 1$ . Число связанных электронов на каждой подоболочке атома составляет  $2(2l + 1)$  [2, 7]. Поэтому, например, для электронного слоя  $K$  с  $n = 1$  и его электронов возможно только одно энергетическое состояние  $s$  ( $l = 0$ ); для слоя  $L$  с  $n = 2$  – состояния  $s$  ( $l = 0$ ) и  $p$  ( $l = 1$ ); для слоя  $M$  с  $n = 3$  – состояния  $s$  ( $l = 0$ ),  $p$  ( $l = 1$ ) и  $d$  ( $l = 2$ ); для слоя  $N$  с  $n = 4$  – состояния  $s$  ( $l = 0$ ),  $p$  ( $l = 1$ ),  $d$  ( $l = 2$ ) и  $f$  ( $l = 3$ ), а для слоя  $O$  с  $n = 5$  – состояния  $s$  ( $l = 0$ ),  $p$  ( $l = 1$ ),  $d$  ( $l = 2$ ),  $f$  ( $l = 3$ ) и  $g$  ( $l = 4$ ). В этой связи в атоме любого вещества число связанных электронов в состоянии  $s$  составляет 2, в состоянии  $p$  – 6, в состоянии  $d$  – 10, в состоянии  $f$  – 14 и в состоянии  $g$  – 18.

В атомной физике установлено, что порядок заполнения связанными электронами в атомах энергетических состояний в электронных слоях и электронных подоболочках (в пределах одного слоя), в основном, должен соответствовать радиальной последовательности расположения энергетических уровней с данными значениями квантовых чисел  $n$  и  $l$ , а также принципу Паули (в любом атоме не может быть двух электронов, находящихся в двух одинаковых стационарных состояниях, определяемых набором следующих четырех квантовых чисел: главного  $n$ , орбитального  $l$ , магнитного  $m_l$  и спинового  $m_s$ ) [2, 7]. Такой порядок приводит к тому, что для легких атомов сначала заполняется электронный слой с меньшим значением главного квантового числа  $n$  и только потом должен заполняться электронами следующий электронный слой с большим значением  $n$ . При этом внутри каждого электронного слоя сначала заполняются энергетические состояния (подоболочки) с  $l = 0$  ( $s$ - подоболочка), а затем состояния с большими значениями орбитального числа  $l$  (вплоть до  $l = n - 1$ ). Этот порядок застройки электронами слоев и подболочек для ряда химических элементов в периодической системе Д.И. Менделеева может нарушаться, начиная с калия  $K$  ( $n = 4$ ). Так, для так называемых переходных химических элементов электронная застройка их предыдущих слоев с меньшим значением главного квантового числа  $n$  может происходить при уже частично заполненных связанными электронами их последующих слоев с большими значениями  $n$  [2, 7]. Это объясняется тем, что при достаточно больших значениях главного квантового числа  $n$  взаимодействия между связанными электронами оболочки атома приводит к тому, что состояния с большими  $n$  и меньшими значениями орбитального квантового числа  $l$  могут иметь меньшую энергию и оказаться для атома вещества энергетически более выгодными, чем состояния с меньшими  $n$ , но с большими  $l$  [5, 7].

Как видим, связанные электроны являются неотъемлемой составной частью любых атомов и молекул вещества, встречающихся в земной природе.

## 2. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ОПРЕДЕЛЕНИИ СВОЙСТВ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ВЕЩЕСТВА

В атомах те связанные электроны, которые входят в состав внешнего электронного слоя с наиболь-

шим значением главного квантового числа  $n$ , а также принадлежат  $s$ - и  $p$ - подоболочкам, то есть имеют орбитальные квантовые числа  $l=0$  или  $l=1$ , получили название валентных электронов [2, 7]. Из предыдущего раздела 1 следует, что общее число валентных электронов на  $s$ - и  $p$ - подоболочках атомов для ряда элементов и образуемых ими молекул может в пределе составлять восемь. Образование таких подоболочек в атомах и молекулах приводит к созданию устойчивых внешних электронных слоев и соответственно к появлению устойчивых химических элементов и их соединений. Именно валентные электроны и определяют химические и оптические свойства атомов (молекул) любого известного нам сейчас вещества [7].

Молекула, как известно, может состоять из одинаковых или различных атомов вещества. Эти атомы в молекуле соединены химическими связями, которые объясняются различными взаимодействиями их валентных электронов. В основе большинства химических реакций, протекающих благодаря указанным химическим связям, лежит отдача или присоединение валентных электронов атомов взаимодействующих веществ (элементов) [2, 7]. Из атомной физики и электрохимии известно, что если у взаимодействующего атома имеются менее чем наполовину занятые связанными электронами  $s$ - и  $p$ - подоболочки (энергетические состояния), то для него энергетически выгодна отдача другим атомам собственных валентных электронов. В случае, когда у взаимодействующего атома  $s$ - и  $p$ - подоболочки (энергетические состояния) более чем наполовину заняты связанными электронами, для него более выгодным энергетически оказывается присоединение к себе валентных (внешних) электронов от других атомов, участвующих в процессе взаимных химических реакций [2, 7].

Из классической физики известно, что молекулы, образовавшиеся в результате превращения взаимодействующих между собой атомов вещества в противоположно электрически заряженные и взаимно притягивающиеся ионы, получили название ионных (*гетерополярных*) [5, 7]. Такой тип химической связи атомов в молекуле называется *ионной связью*. В основе образования таких ионных молекул лежит указанное выше поведение взаимодействующих атомов с различно заполненными внешними  $s$ - и  $p$ - подоболочками, обусловленное отдачей или присоединением для них соответствующих валентных электронов. Типичным примером для ионных молекул могут служить молекулы щелочно-галогидных солей, образованные ионами атомов химических элементов I и VII групп периодической системы Д.И. Менделеева [7]. Например, более конкретно молекулы поваренной соли NaCl, состоящие из положительного иона натрия  $\text{Na}^+$  и отрицательного иона хлора  $\text{Cl}^-$ . Заметим, что щелочные металлы I группы имеют сравнительно небольшие значения потенциала и соответственно энергии ионизации  $E_0$  (например, для одновалентного натрия первый ионизационный потенциал  $E_{01}=5,12 \text{ эВ} = 8,20 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$  [5]). Следует напомнить, что значение  $E_0$  соответствует энергии освобождения одного внешнего (валентного) электрона из нейтрального атома

вещества. Так как все щелочные металлы обладают минимальными ионизационными потенциалами, то поэтому их такой представитель как натрий Na активно и ведет себя в химических процессах. В тоже время атомы элементов-металлоидов VII группы характеризуются большой величиной "электронного сродства", то есть величиной количества энергии, выделяющейся в случае присоединения к атому металлоида данной группы валентного электрона от атома из другой группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева [5, 7]. В этой связи переход валентного электрона от атома натрия Na к атому металлоида-хлора Cl приводит к образованию ионов, каждый из которых обладает устойчивой внешней совместной восьмиелектронной ( $s + p$ )- подоболочкой, что во многом и определяет химические свойства образующегося нового вещества. Такой переход валентного электрона обуславливает образование в итоге устойчивой ионной молекулы поваренной соли NaCl. Можно уверенно говорить о том, что мы на конкретном примере убедились в определяющей роли валентных электронов в протекании химических реакций и в конечном формировании с их (электронов) помощью новых химических свойств у получаемых в ходе этих химических реакций новых соединений.

Другим примером молекул являются так называемые атомные (*гомеополярные*) молекулы. Химическая связь атомов в гомеополярных молекулах называется *ковалентной связью* [2, 7]. Типичным примером атомной молекулы является молекула простейшего газообразного вещества – водорода  $\text{H}_2$ , состоящая из двух ядер – протонов  $p_e$  и двух связанных и вращающихся вокруг них электронов. Неразличимость тождественных связанных электронов-фермионов согласно квантовой статистике Ферми – Дирака [4] в молекуле водорода  $\text{H}_2$  приводит здесь к существованию так называемого "квантовомеханического обменного взаимодействия", возникающего между этими двумя связанными электронами [5, 7]. Благодаря такому взаимодействию электрон каждого из атомов молекулы водорода  $\text{H}_2$  проводит некоторое время у ядра другого атома. Таким путем в молекуле водорода  $\text{H}_2$  осуществляется связь обоих атомов, образующих единую атомную молекулу. Современные квантовомеханические расчеты показали, что при сближении двух водородных атомов H на расстояние, соизмеримое с первым боровским радиусом электрона  $r_{e1}=0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  в планетарно-квантовой модели Н. Бора для атома водорода [4, 5], в случае антипараллельности спинов (собственных вращений) рассматриваемых связанных электронов атомарного водорода возникает притяжение обоих атомов друг к другу и, в конце концов, образуется устойчивая атомная молекула водорода  $\text{H}_2$  [7]. При параллельности же спинов связанных электронов водородные атомы H отталкиваются друг от друга и молекула водорода  $\text{H}_2$  не образуется [5, 7]. Нам теперь совершенно ясно видно, что внешние связанные или валентные электроны в атоме вещества могут оказывать сильное влияние на протекание на квантовофизическом уровне обменных межатомных микропроцессов, ведущих к образова-

нию новых химических элементов и веществ (материалов) с новыми физико-химическими свойствами.

Остановимся далее на влиянии связанных электронов атомов и молекул вещества на их оптические свойства. Среди оптических свойств атома вещества важнейшим является его спектр излучения. Так, частоты спектральных линий  $\nu$  в дискретном линейчатом спектре атома водорода Н описывается известной формулой Бальмера – Ридберга [5, 7]:

$$\nu = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1)$$

где  $R = m_e e_0^4 / (8 \epsilon_0^2 h^3)$  – постоянная Ридберга, равная  $3,2931193 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ ;  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$  – постоянная Планка.

В (1) целое положительное число  $n = 1, 2, 3, \dots$  принято называть главным квантовым числом для электронной оболочки атома (именно оно и нумерует от центра атома к его периферии возможные орбитали связанного электрона в этой стратифицированной оболочке), причем  $m = n + 1, n + 2, n + 3, \dots$ . Группа линий с одинаковым значением квантового числа  $n$  называется "серией". Приведем известные нам "серии" водородного спектра [7]:  $n = 1$  – "серия Лаймана" (переход вышерасположенного электрона на уровень с  $n = 1$ );  $n = 2$  – "серия Бальмера" (переход вышерасположенного электрона на уровень с  $n = 2$ );  $n = 3$  – "серия Пашена" (переход вышерасположенного электрона на уровень с  $n = 3$ );  $n = 4$  – "серия Брэкета" (переход вышерасположенного электрона на уровень с  $n = 4$ );  $n = 5$  – "серия Пфунда" (переход вышерасположенного электрона на уровень с  $n = 5$ );  $n = 6$  – "серия Хемфри" (переход вышерасположенного электрона на уровень с  $n = 6$ ). Из (1) следует, что переходы связанного электрона в атомарном водороде Н с разных вышерасположенных энергетических уровней (возбужденных состояний) на те или иные нижерасположенные энергетические уровни (условно стационарные состояния) сопровождается соответствующей частотой  $\nu$  электромагнитного излучения, отвечающей знаменитой формуле Планка [5]. Поэтому можно обоснованно заключить, что частоты  $\nu$  в спектре электромагнитного излучения (оптические свойства) для атома водорода Н целиком определяются квантовыми переходами в электронной оболочке данного атома его единственного связанного электрона с одних энергетических уровней (орбиталей) на другие.

При изучении взаимодействия света с веществом физиками было установлено, что на процессы распространения в нем переменного электромагнитного поля световой волны определяющую роль в области видимого и ультрафиолетового электромагнитного излучения играют вынужденные колебания внешних и наиболее слабо связанных (валентных) электронов атомов и молекул вещества. Поэтому данные электроны иногда называют еще и оптическими электронами [7]. Эти электроны, совершая под действием света вынужденные колебания, излучают вторичные световые волны той же частоты. Данные вторичные волны когерентны (согласованы по фазам) и интерферируют при своем наложении. В случае изотропной

среды эти вторичные волны образуют проходящую в веществе волну, направление которой совпадает с направлением распространения первичной световой волны длиной  $\lambda_c$ . Для оптически неоднородной среды, показатель преломления которой изменяется от точки к точке вследствие флуктуаций ее плотности, в результате наложения первичной и вторичной волн возникает рассеяние света [7]. Согласно классической электронной теории дисперсии света переменное электромагнитное поле белого света вызывает электронную поляризацию среды, приводящую к изменению относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  этой среды и ее зависимости от частоты  $\nu$  волн падающего на нее света [5, 7]. В процессе этой поляризации среды основная роль отводится оптическим электронам ее атомов. Изменение  $\epsilon$  обуславливает изменение показателя преломления  $n_c$  для среды, в которой распространяется свет, и его частотную зависимость. Такое изменение  $n_c$  ведет к изменению фазовой скорости света и ее зависимости от частоты  $\nu$ , что и приводит к дисперсии света. Поэтому связанные электроны атомов вещества могут оказывать сильное электрофизическое влияние на рассеяние, поглощение и дисперсию падающего света в этом веществе.

В качестве оптических свойств молекул вещества выберем их оптические спектры, представляющие собой совокупность полос, образованных тесно расположенными спектральными линиями [7]. Указанные полосы в молекулярных спектрах наблюдаются в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах шкалы электромагнитных волн. Близко расположенные полосы образуют группы полос. Известно, что у простейших двухатомных молекулах наблюдаются несколько групп полос, а у многоатомных сложных молекулах в видимой и ультрафиолетовой областях спектра наблюдаются широкие сплошные полосы испускания и поглощения электромагнитного излучения [5, 7]. Согласно физическим данным, приведенным в [7], наиболее заметное влияние на частоту  $\nu$  и энергию фотона, испускаемого молекулой при изменении ее энергетического состояния, оказывает дискретное квантованное изменение энергии движения связанных электронов в оболочках ее атомов. Отметим, что на частоту фотонного излучения из молекулы вещества дополнительное влияние, но в меньшей по сравнению с изменением энергии электронов ее атомов степени, оказывает изменение энергии колебательного движения ядер ее атомов и изменение энергии вращательного движения молекулы [7]. И на оптические свойства молекул вещества, как нам теперь хорошо видно, существенное влияние оказывают связанные электроны ее атомов, соответствующим образом расположенные в их электронных слоях.

### 3. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ФОРМИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКАХ

В твердых металлических проводниках существуют так называемые свободные электроны, образующие электроны проводимости с усредненной про-

странственной плотностью  $n_{e0}$ , способные под действием внешнего электрического поля с усредненной напряженностью  $E_z = U_{\text{пр}} / l_{\text{пр}}$ , где  $U_{\text{пр}}$  – приложенное к проводнику длиной  $l_{\text{пр}}$  электрическое напряжение, упорядочено перемещаться (дрейфовать) по кристаллической решетке материала проводников. Величина  $n_{e0}$  определяет усредненную объемную плотность отрицательного электрического заряда в указанных проводниках  $\rho_{e0} = e_0 \cdot n_{e0}$ , составляющую, например, для широко используемого в электротехнике такого проводникового материала как медь Cu ( $n_{e0} = 16,86 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  [5]), колоссальную величину, примерно равную  $2,7 \cdot 10^{10} \text{ Кл/м}^3$  [9]. Поэтому благодаря такой огромной величине  $\rho_{e0}$  в проводниках оказался и возможным процесс формирования в их металле электрического тока проводимости  $i_{\text{пр}}$  различных амплитудно-временных параметров (АВП), который, как известно, соответствует всякому упорядоченному движению электрических зарядов. Будем придерживаться той научной концепции, что свободные электроны в материале любого проводника образуются из внешних связанных (валентных) электронов его атомов [2, 7]. В рассматриваемых проводниках происходит просто обобществление этих валентных электронов атомов их материала, которые из-за внешнего силового энергетического влияния отделились от "своих" атомов и образовали так называемый коллективизированный "электронный газ" металла проводника с огромной усредненной плотностью  $\rho_{e0}$ .

С учетом изложенного нами выше в разделе 1 очевидно, что валентные электроны расположены на  $s$  ( $l = 0$ )– и  $p$  ( $l = 1$ ) – подболочках внешнего электронного слоя атомов металла проводника. Их общее максимальное число в каждом атоме для наиболее распространенных проводниковых материалов (например, для меди Cu, серебра Ag, железа Fe, цинка Zn и алюминия Al) составляет согласно периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева три (два на  $s$ – подболочке и один на  $p$ – подболочке) [5, 7]. Что касается непроводниковых материалов (например, инертных газов, образующих VIII группу в указанной периодической системе химических элементов), то для них максимальное число валентных электронов может достигать восьми (два на  $s$ – подболочке и шесть на  $p$ – подболочке). Такая электронная конфигурация для элементов VIII группы обеспечивает их инертность к химическим взаимодействиям с другими элементами, что и служит гарантом для их устойчивого существования в природе.

Отметим, что сейчас в теории электричества и прикладной электротехнике за положительное направление электрического тока принято направление упорядоченного движения положительных электрических зарядов [10], хотя в действительности в металлических проводниках ток вызван упорядоченным движением его свободных электронов с отрицательным электрическим зарядом в направлении, противоположном указанному чуть выше. Для постоянного во

времени  $t$  напряжения  $U_{\text{пр}}$ , приложенного к противоположным концам проводника, электрический ток  $i_{\text{пр}}$  в нем будет соответствовать однонаправленному перемещению (дрейфу) в металле проводника его свободных электронов. Для переменного (двухполярного импульсного) напряжения  $U_{\text{пр}}$ , действующего на металлическую структуру проводника, электрический ток проводимости  $i_{\text{пр}}$  будет представлять собой гармонические (осциллирующие) продольные колебания вдоль оси проводника его "электронного газа" или "электронного облака" во взаимно противоположных направлениях. Чем выше частота  $f_U$  изменения во времени  $t$  приложенного к проводнику электрического напряжения  $U_{\text{пр}}$ , тем будет больше частота соответствующих пространственных колебаний "электронного газа" металла проводника и соответственно частота колебаний  $f_i = f_U$  электрического тока  $i_{\text{пр}}$  в металлическом проводнике [9].

Читателю необходимо помнить, что свободные электроны металлических проводников как квантовые объекты имеют дуалистическую природу [5, 9]: они одновременно являются элементарными частицами – корпускулами и электронными волнами соответствующей длины  $\lambda_e$ . Дуализм свободных электронов металлических проводников приводит к проявлению ряда электрофизических особенностей при формировании с их помощью электрического тока проводимости  $i_{\text{пр}}$  различных АВП и его волновом квантованном продольном (радиальном) распределении в металлических проводниках [11, 12]. Причем, учет данных квантованных проявлений поведения свободных электронов в металле оказался крайне важным для области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) и техники больших импульсных токов (БИТ). Именно в областях ВИТ и БИТ используются высокие плотности электрического тока, когда наиболее ярко и наглядно для нас в металле проводника проявляются волновые свойства его свободных электронов. Здесь эти особенности могут проявляться в виде квантово-физических продольно-радиальных периодических макроскопических электронно-тепловых структур с наличием "горячих" и "холодных" участков проводника [13–15]. Основные результаты многолетних исследований наиболее полно изложены автором в его недавно вышедшей из печати монографии [16]. Поэтому можно констатировать, что при получении электрического тока проводимости различных АВП в твердых металлических проводниках главную электрофизическую роль выполняют их свободные электроны.

#### 4. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ, ПЕРЕДАЧЕ И ПОТРЕБЛЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

На заключительном этапе производства электрической энергии в промышленных условиях в турбогенераторе силового энергоблока электростанции (ЭС), как известно, используется фундаментальный закон

электромагнитной индукции Майкла Фарадея [5,17], открытый этим великим английским электрофизиком-самородком еще в 1831 году [3, 4]. Суть этого закона сводится к тому, что изменяющееся во времени  $t$  или в пространстве магнитное поле создает (индуцирует) в размещенном в таком поле металлическом проводнике электродвижущую силу (ЭДС), которая при соответствующих условиях для проводника вызывает в его металле протекание индукционного электрического тока ротора турбогенератора энергоблока, создающего своими магнитными полюсами с обмотками возбуждения (или без них) в рабочем кольцевом воздушном зазоре между ротором и статором турбогенератора бегущее (вращающееся) магнитное поле (было изобретено великим сербско-хорватским электротехником и электрофизиком Николой Теслой в 1882 году [4, 18]), в распределенных по окружности и изолированных от заземленного металлического корпуса турбогенератора обмотках его статора будет индуцироваться переменная ЭДС. Данная ЭДС (переменное электрическое напряжение) будет во времени  $t$  в соответствии с характером поведения круговых функций изменяться по гармоническому закону. При генерации трехфазной ЭДС (переменного трехфазного электрического напряжения  $U_c$ ) электрические обмотки статора турбогенератора, содержащие изолированные между собой и от корпуса статора витки сложной формы из обычно медного провода, разнятся между собой на угол  $120^\circ$ . Полученные с электрических обмоток статора переменные ЭДС соответствующих фаз (фазные электрические потенциалы или напряжения) выводятся с помощью изолированных металлических проводов (шин) на соответствующие клеммы распределительного электрического щита турбогенератора силового энергоблока ЭС [19].

Далее возникает задача передачи выработанных с помощью турбогенератора энергоблока ЭС фазных электрических потенциалов (переменных электрических напряжений  $U_c$  разных фаз) к потребителю электрической энергии. Вот тут-то активно и "вступают" в действие описанные выше в разделе 3 свободные электроны твердых металлических проводников. Сначала эти проводники со своими внутрискруктурными "электронными облаками" обеспечивают в соответствующих преобразующих, технологических и защитных электроустройствах (например, силовых трансформаторах, токовыводах, реакторах) подготовку фазных напряжений  $U_c$  (прежде всего, их резкого повышения по амплитуде) для применяемой сейчас проводной передачи электрической энергии с помощью воздушных или кабельных линий электропередачи (ЛЭП) к ее различным потребителям [19].

Потом проводящие структуры металлических токопроводов ЛЭП напрямую участвуют в процессе передачи электрической энергии от распределительных устройств генерирующей станции к подстанциям и ее отдельным потребителям. Данное участие металлических токопроводов ЛЭП в передаче электроэнергии, по мнению автора, сводится к ее направлению в требуемое месторасположение потребителя этой энер-

гии. В этом случае металлические токопроводы ЛЭП со своими свободными электронами выполняют важную роль направляющих электромагнитных структур, определяющих требуемое направление потока электромагнитной энергии от ЭС к ее потребителю [20]. Без таких металлических структур со своими свободными электронами просто невозможно обеспечить в указанном безизлучательном режиме канализации электроэнергии ее доставку в заданную точку территории того или иного региона. В тоже время сама электроэнергия в рассматриваемом проводном способе ее транспортировки от ЭС к потребителю будет передаваться лишь вдоль изоляционной среды, прилегающей к металлическим поверхностям токопроводов ЛЭП [17, 20]. Наличие в токопроводах ЛЭП металлических структур будет приводить и к паразитным джоулевым потерям электромагнитной энергии, вызванным рассеиванием квантованных электронных волн де Бройля, порождаемых дрейфом свободных электронов металлических токопроводов, на тепловых колебаниях регулярно расположенных положительных ионов кристаллической решетки основных электропроводящих структур ЛЭП [20].

Что касается роли свободных электронов металлических токопроводов в процессе потребления электрической энергии, то она по физике мало чем будет отличаться от их роли непосредственно при подготовке этой энергии к передаче и при ее самой проводной передаче к потребителю. При чисто омической электрической нагрузке у потребителя (например, лампах накаливания) роль свободных электронов ее металлических элементов будет сводиться к диссипации (рассеиванию) подводимой к нагрузке электроэнергии на их кристаллической решетке. Ясно, что для постиндустриального человеческого общества электроны металлических проводников имеют важное значение при производстве, проводной передаче и потреблении (скажем, путем активного рассеивания на омическом сопротивлении) электрической энергии.

## 5. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЗДАНИИ ПРОВОЛОЧНОЙ И БЕСПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

Первоначально, как всем нам хорошо известно, был изобретен телефонный аппарат, базирующийся на передаче через коммутационную станцию посредством телефонного кабеля электрического сигнала от одного его пользователя (абонента) к другому. Произошло это во второй половине 19 – столетия в США. Автором этого великого изобретения от 1876 года в истории человечества считается известный американский электротехник Александр Белл [21]. Передача по телефонному кабелю, содержащему прямой и обратный тонкие изолированные металлические (как правило, медные) провода (или иначе называемые "проводные пары"), электрического сигнала с амплитудой электрического напряжения до 30 В даже в режиме постоянного электрического тока, как мы знаем (см. разделы 3 и 4), невозможна без участия свободных электронов металла его проводных пар. Кроме того, данный тип электронов используется и в самой телефонной трубке, где с помощью токнесущих метал-

лических элементов наушников и микрофона происходит преобразование электрического сигнала в звуковой и наоборот. Из мировой истории телефонизации известно, что наиболее проблемной задачей для человечества оказалась задача создания трансатлантического подводного телефона, имеющего общую протяженность около 4000 км [22]. Здесь специалисты, начиная с 40-х годов 20-го столетия, столкнулись с проблемой большого пространственного затухания передаваемого электрического сигнала вдоль металлических жил подводного коаксиального кабеля с полиэтиленовой изоляцией. Так как при этом использовались частоты передаваемого сигнала порядка 100 кГц, то тепловые (джоулевые) потери энергии в медных жилах кабеля (яркое проявление в них уже паразитного влияния свободных электронов) на участке глубоководной трассы всего лишь длиной порядка 100 км сводили практически «на нет» вводимую в нее полезную электрическую мощность. Проблема трансокеанской телефонии была успешно решена лишь к осени 1956 года с помощью подводных автономных промежуточных электронных усилителей электрической мощности, размещенных по телефонной трассе на расстоянии в 70 км друг от друга и работающих в спектре частот 20 – 160 кГц с усилением сигнала в 60 дБ (в 1000 раз) на наивысшей частоте [22].

Что касается современного мобильного телефона, то и здесь без участия свободных электронов металлических структур пока никак не обойтись: они не заменимы при зарядке и рабочей разрядке его миниатюрного электрического аккумулятора (автономного источника электрического питания на напряжение до 12 В, обеспечивающего протекание микротоков в электроблоках телефона), функционировании его основных электрических схем и приемно-передающих устройств, работающих в диапазоне электромагнитных волн порядка 1 ГГц, а также при указанном выше преобразовании электрических и звуковых сигналов.

Намного раньше зарождения и развития телефонии в мире в первой половине 19-го века происходило становление проволочной электросвязи в виде телеграфии [3, 4]. Данный вид связи позволял осуществлять быструю передачу и прием сообщений на большие расстояния при помощи электрических сигналов, передаваемых по проводной линии. В начале такая передача производилась при помощи специальных знаковых символов и кодов (например, азбуки Морзе от 1837 года [4]), а в настоящее время широко применяются буквопечатающие телеграфные аппараты (например, телетайпы). Отметим, что сейчас в мире получило весьма широкое распространение международное абонентское телеграфирование (телекс) – проводная электрическая связь между абонентами (отдельными лицами, организациями), ведущими документальные переговоры, прямо фиксируемые на бумаге [1]. При практической реализации телеграфии в режиме передачи и приема электрических сигналов напрямую используются свободные электроны металлических проводов линий связи (см. разделы 3 и 4).

В конце 19-го столетия, благодаря пионерским работам, прежде всего, известных физиков того времени – Генриха Герца (Германия) и Александра По-

пова (Россия), человечество получило в свое распоряжение крупнейшее научно-техническое изобретение – беспроводную электросвязь, осуществляемую на дальние расстояния при помощи высокочастотных электромагнитных колебаний (радиоволн) [3, 4]. Большой вклад в развитие этого вида электросвязи (радиотелеграфии), но не в ее открытие, внес и итальянский инженер – радиотехник Гульельмо Маркони, получивший в 1909 году Нобелевскую премию по физике за изобретения в области беспроводной электросвязи (радиосвязи). И здесь люди не обошлись без непосредственного участия свободных электронов в получении электромагнитных волн радиочастотного диапазона (в электроцепях радиопередатчика), их передаче через воздушное пространство и в приеме пользователем (в электроцепях радиоприемника) [23].

Необходимо указать, что в настоящее время в силовой радиоэлектронике при создании мощных радиопередатчиков основным типом сверхвысокочастотных электрических генераторов в сантиметровом и длинноволновой части миллиметрового диапазонов радиоволн является магнетрон [4,23]. В таком электровакуумном приборе как магнетрон, содержащем двухэлектродную коаксиальную систему "катод – анод" и являющемся источником мощного потока сверхвысокочастотной электромагнитной энергии, основным генерирующим элементом служит мощный вращающийся в постоянном магнитном поле вихревой поток электронов. Вывод усиленной магнетроном сверхвысокочастотной электромагнитной энергии осуществляется из его настроенных в резонанс миниатюрных объемных резонаторов, круговым образом размещенных вдоль электрода-анода. Кроме того, электроны не заменимы и в таких мощных современных радиоэлектронных устройствах как лампа бегущей (ЛБВ) и лампа обратной (ЛОВ) волны, используемых в мощных радиопередатчиках при генерировании электромагнитных колебаний соответственно в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн [4, 23]. Накопленная в ЛБВ или ЛОВ кинетическая энергия движущимися электронами в их ускоряющей вакуумной системе "катод – анод" после ее частичной передачи в конце ускорения тормозящему их сверхвысокочастотному электромагнитному полю выводится наружу при помощи волноводов и направляется в излучающую систему радиопередатчика.

## 6. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЗДАНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ИНДУСТРИИ, ТРАНСПОРТА, БЫТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И КОМПЬЮТЕРОВ

Современная промышленность не мыслима без электротранспорта при доменном производстве металла, металлургических прокатных станов (блюмингов и слябингов), металлообрабатывающих станков, подъемных электрокранов, наземных и воздушных транспортных средств, ткацких станков, деревообрабатывающих и бумагоделательных машин. Указанные основные производственные механизмы и средства, в свою очередь, не мыслимы без использования электродвигателей, в которых электромагнитная энергия обмоток статора и сети преобразуется в механиче-

скую энергию движущихся частей их ротора. Круговое вращение ротора электродвигателя через систему промежуточных механизмов может преобразовываться в иные виды движения отдельных частей указанных основных производственных средств. Работа же электродвигателя, как и электрогенератора, в свою очередь, также не мыслима без участия свободных электронов, дрейфующих в металле проводов их электрических обмоток. Именно данное направленное движение (дрейф) свободных электронов вызывает появление в металлических проводах электрических обмоток статора электродвигателя (ротора электрогенератора) переменного электрического тока проводимости, вызывающего создание вокруг витков указанных обмоток вращающегося переменного магнитного поля. Взаимодействие данного магнитного поля в электродвигателе с металлическими частями ротора (например, его электрическими обмотками) приводит в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея к возникновению в них переменных ЭДС и протеканию, благодаря свободным электронам, в их металле соответствующих электрических токов. Силовое взаимодействие переменных магнитных полей и токов статора и ротора электродвигателя вызывает в рассматриваемой электромагнитно-механической системе появление электродинамических сил, обуславливающих круговое вращение ротора электродвигателя.

Вся наша бытовая электротехника (например, холодильники, пылесосы, кухонные комбайны, электробритвы и телевизоры) использует для своего функционирования косвенно или прямо электроны. Так, все вышеперечисленные бытовые электроприборы, кроме последних, не могут обойтись при своей работе без электродвигателей и протекающих в их электрообмотках электрических токов проводимости, представляющих собой направленное движение свободных электронов. В телевизорах же, электроны, кроме создания электрических токов в металлических проводах и тонких токопроводящих "дорожках" плат разнообразных схем их взаимосвязанных электроблоков, применяются при создании черно-белого или цветного изображения на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) [4]. Заметим, что в последние годы благодаря научно-техническому прогрессу в телевизорах, наряду с применением обычных ЭЛТ, используются плазменные и жидкокристаллические экраны.

Принципиально не обойтись без помощи электронов и современной компьютерной технике. Работа основного блока компьютера, его дисплея (особенно с ЭЛТ), клавиатуры, принтера и выход в Интернет напрямую связаны с использованием проводной как внутриблочной, так и междублочной электрической связи. Главным действующим "лицом" в этой проводной электросвязи компьютера является все тот же его Величество Свободный Электрон.

## 7. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ИЗУЧЕНИИ МИКРОСКОПИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА И ПОЛУЧЕНИИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время одним из современных методов физико-химического анализа многих веществ является метод просвечивающей электронной микро-

скопии [24]. Данный метод базируется на применении электронных микроскопов [25], в которых при ускоряющих электрических напряжениях до 100 кВ в системе "остроконечный катод с цилиндром Венельта – дисковый анод с центральным отверстием" сфокусированные в вакууме в пучок при помощи электронных линз нерелятивистские электроны направляются на тонкие препарированные элементы исследуемого объекта. После "просветки" таких прозрачных для электронов тонких срезов наблюдаемого объекта эти электронные лучи при помощи системы электронных диафрагм и линз попадают на плоскость экрана конечного изображения с люминофором, где с помощью камеры наблюдения, имеющей бинокулярный микроскоп, и фотокамеры производится фиксация получаемых микроснимков изучаемого образца вещества. Заметим, что разрешающая способность в обычных светооптических микроскопах, равная минимальному радиусу кружка дифракционного рассеяния света  $\rho_0$  на предметном столе наблюдения микроскопа, определяется следующим выражением [25]:

$$\rho_0 = \frac{0,61\lambda_c}{n_c \sin \alpha_0}, \quad (2)$$

где  $\lambda_c$  – длина световой волны;  $n_c$  – показатель преломления среды, расположенной между исследуемым объектом и объективом светового микроскопа;  $\alpha_0$  – апертурный угол наблюдения исследуемого объекта в световом микроскопе или возможно и в ином типе микроскопа, использующем вместо белого света другой вид воздействующих на объект лучей.

Так как минимальная длина волны  $\lambda_c$  в видимой части спектра электромагнитного излучения (для белого света) составляет порядка 400 нм [7], то согласно (2) для высококачественных объективов с апертурным углом не более  $\alpha_0=70^\circ$  (при этом  $\sin \alpha_0=0,94$ ) даже при использовании в светооптическом микроскопе перед его объективом специальных иммерсионных жидкостей с наибольшим показателем преломления  $n_c=1,5$  максимальная разрешающая способность таких микроскопов  $\rho_0$  составляет величину, примерно равную  $\lambda_c/2$ , то есть численно составляющую в нашем случае около 200 нм [25].

Электронный же микроскоп, использующий для формирования изображения структуры исследуемого образца остро направленное электронное излучение (электронный пучок лучей), позволяет кардинально улучшить разрешающую способность  $\rho_0$  при наблюдении очень малых (микроскопических) объектов. Обусловлено это тем, что в соответствии с известной в волновой механике формулой де Бройля длина волны электрона  $\lambda_e$ , движущегося со скоростью  $v_e$ , выражается следующей формулой [5]:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v_e}. \quad (3)$$

Поэтому согласно (3) при практическом использовании в современном электронном микроскопе электронов с досветовыми скоростями ( $v_e < c$ , где  $c=3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме [5]) величиной

равной реально около  $1,8 \cdot 10^8$  м/с длина их волны  $\lambda_e$  может составлять примерно 0,004 нм. Тогда с учетом (2) оценочная разрешающая способность  $\rho_0$  электронного микроскопа будет примерно равной  $\lambda_e/2$ , что может для рассматриваемого случая численно составить величину около 0,002 нм. Сравнивая приведенные выше численные данные для  $\rho_0$ , можно заключить, что в нашем случае теоретически разрешающая способность электронного микроскопа в  $10^5$  раз выше, чем для светооптического микроскопа. Однако на практике, как оказалось, реально достижимое разрешение электронных микроскопов превышает разрешение световых микроскопов лишь в  $10^3$  раз [25]. Данное расхождение связано с тем, что в электронно-оптических линзах по сравнению со световыми линзами значительно больше ошибки изображения объекта наблюдения или так называемые аберрации [25]. В этой связи для снижения влияния аберраций в электронных микроскопах приходится уменьшать величины апертурных углов  $\alpha_0$  практически в  $10^2$  раз по сравнению с апертурными углами  $\alpha_0$  в светооптических микроскопах и соответственно во столько же раз увеличивать величину разрешения  $\rho_0$ .

Электронные микроскопы позволяют проводить прямое электронно-микроскопическое исследование самых разнообразных объектов, начиная с легких органических структур и заканчивая тяжелыми металлами. Получаемая с их помощью информация не ограничивается только сведениями о геометрических характеристиках объектов, но и включает в себя данные об их внутренней кристаллографии и о возникающих несовершенствах (дислокациях) в микроскопических структурах исследуемых материалов. Последнее является весьма важным при получении новых видов материалов (например, различных композиций, упрочненных металлов и градиентных структур) с улучшенными физико-механическими свойствами, упорядоченными внутренними структурами и содержащими минимум дефектов в своем строении.

Важным физическим инструментарием при изучении внутреннего строения вещества (материи) оказались линейные (ЛУЭ) и циклические (ЦУЭ) ускорители электронов [4, 5]. Ускоренные в вакууме до огромных скоростей  $v_e$  в данных сложных, крупногабаритных и дорогостоящих электрофизических установках, принцип работы которых практически аналогичен работе миниатюрной вакуумной радиоэлектронной лампы, суб- и ультрарелятивистские электроны при встрече на своем пути движения с ядерной мишенью способны вызвать в ней эффекты взаимодействия, связанные с конечными микроскопическими размерами ядер ее атомов, а также с размерами их (ядер) образующих элементарных частиц [4, 5]. Для этого необходимо, чтобы длина волны электронов  $\lambda_e$ , ускоренных в ЛУЭ или ЦУЭ (например, в микротронах, бетатронах), была порядка  $10^{-15}$  м и менее (порядка радиуса ядра атома изучаемого вещества и меньше). Для получения таких длин электронных волн  $\lambda_e$  энергия электронов  $W_e$  в ускорителе данных элементарных частиц должна в соответствии с ниже-

приведенной квантовомеханической формулой, вытекающей из закономерностей волновой механики [5,7],

$$W_e = \frac{hc}{\lambda_e}, \quad (4)$$

составлять значение, равное около 1,24 ГэВ. Заметим, что, например, на Стэнфордском ЛУЭ (США) были получены в свое время рекордные значения энергии ультрарелятивистских электронов  $W_e$ , составляющие примерно 20 ГэВ [4, 5]. При этом их длина  $\lambda_e$  на выходе электронного пучка из указанного ЛУЭ на основании (4) составляла величину, примерно равную  $6,2 \cdot 10^{-17}$  м. Видно, что найденная нами согласно (4) длина волны электрона  $\lambda_e$  практически на два порядка меньше его приближенного радиуса  $r_e$ , оцененного нами на основании представлений классической физики и указанного автором выше во Введении данной статьи. К этому следует добавить то, что даже при современной предельной разрешающей способности физических измерений микрообъектов в  $10^{-18}$  м размеры электрона достоверно определить пока все же не удалось [4, 5]. Именно такой физический парадокс и заставляет физиков-ядерщиков проводить дальнейшие углубленные работы по экспериментальному уточнению физико-квантовомеханических параметров такой совсем не тривиальной элементарной частицы как электрон, возможно способному дать новую оценку существующим физическим теориям, научным концепциям и нашим представлениям по устройству микромира и макромира в земных условиях [5, 26]. Можно с полным на то основанием утверждать, что ускоренные до больших скоростей  $v_e$  не- и релятивистские электроны в настоящее время занимают важную нишу в физическом экспериментальном инструментарии, предназначенном для опытного изучения микроустройства любого вещества.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнена определенная систематизация известных электрофизических фактов, непосредственно указывающих на фундаментальную и основообразующую роль электронов в **зарождении** (например, в образовании атомов и молекул вещества), **формировании** (например, в определении свойств атомов и молекул вещества и макрообъектов в целом) и **развитии** (например, в получении электрического тока в проводниках; в производстве, передаче и потреблении электрической энергии; в создании проволочной и беспроводной электросвязи; в создании промышленной индустрии, транспорта, бытовой электротехники и компьютеров; в изучении микроскопического строения вещества) нашей **земной цивилизации**.

2. Учитывая важную роль электронов в электрохимических обменных процессах, происходящих на молекулярном и клеточном уровнях в живой и неживой материи и приводящих к выработке биоэлектрических потенциалов в клетках и тканях человека, животных и растений, которые активно участвуют в регулировании их жизнедеятельности, можно с учетом современных достижений в области биофизики и био-

энергетики вполне обоснованно утверждать, что такие рассмотренные нами выше и входящие в состав атомов всех веществ элементарные частицы как **ЭЛЕКТРОНЫ** составляют физическую основу нашего земного мира.

3. Данный научно-технический панегирик (это иностранное слово происходит от сочетания греческих слов "*logos panēgyrikos*" – "*торжественная речь в честь кого-либо или чего-либо*" [1]) основным и наиболее часто проявляющим себя в области электричества представителям нашего земного микромира – **ЭЛЕКТРОНАМ** представляется его автору – электрофизику достаточно обоснованным с современного уровня научно-технических знаний человечества.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
2. Астафуров В.И., Бусев А.И. Строение вещества. – М.: Просвещение, 1977. – 160 с.
3. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. В 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
5. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
6. Баранов М.И. Приближенный расчет сверхсильных электрических и сильных магнитных полей в атоме вещества // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2006. – №6. – С. 60–65.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
8. Баранов М.И. Эвристическое определение максимального числа электронных полуволн де Бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2007. – №6. – С. 59–62.
9. 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.
10. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
11. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // *Электротехніка.* – 2005. – №7. – С. 25–33.
12. Баранов М.И. Волновое радиальное распределение свободных электронов в цилиндрическом проводнике с переменным электрическим током // *Технічна електродинаміка.* – 2009. – №1. – С. 6–11.
13. Баранов М.И. Квантовомеханический подход при расчете температуры нагрева проводника электрическим током проводимости // *Технічна електродинаміка.* – 2007. – №5. – С. 14–19.
14. Баранов М.И. Экспериментальное исследование квантового эффекта локальной продольной концентрации дрейфующих свободных электронов в металлическом проводе с импульсным током большой плотности // *Технічна електродинаміка.* – 2008. – №2. – С. 9–15.
15. Баранов М.И. Экспериментальное обнаружение и исследование "горячих" и "холодных" продольных участков в тонком металлическом проводе с импульсным током большой плотности // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2008. – №3. – С. 63–68.
16. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. В 2-х томах. Том 2, Книга 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2009. – 384 с.
17. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Том 2. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
18. Баранов М.И. Гениальный изобретатель Никола Тесла // *Электропанорама.* – 2008. – №9. – С. 106–108.
19. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Высшая школа, 1972. – 430 с.
20. Баранов М.И. Полевая и цепная формулировки фундаментальной задачи о передаче электромагнитной энергии в системе "металлический провод – проводящая земля" с переменным электрическим током // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2008. – №2. – С. 59–63.
21. По материалам сайта <http://www.thephone.ru>.
22. Черных Ю.В. Создание трансатлантического подводного телефона // *Электропанорама.* – 2007. – №12. – С. 81–84.
23. Мельник Ю.А., Стогов Г.В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства. – М.: Советское радио, 1973. – 368 с.
24. Хейденрайх Р. Основы просвечивающей электронной микроскопии. – М.: Мир, 1966. – 472 с.
25. Пилянкевич А.Н., Климовицкий А.М. Электронные микроскопы. – Киев.: Техніка, 1976. – 168 с.
26. Барвинский А. Роль физических теорий в научно-технической практике // *Электропанорама.* – 2008. – №9. – С. 98–99.

Поступила 15.06.2009

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт";  
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

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*У статті розглянуто питання математичного моделювання процесів, що відбуваються в індукційно-динамічних системах за допомогою сучасних комп'ютерних програм. Як приклад, розглянуто математичну модель індукційно-динамічного механізму без магнітопроводу та з ферромагнітним магнітопроводом. Надані якісні та кількісні оцінки отриманих результатів.*

*В статье рассматривается вопрос математического моделирования индукционно-динамических систем с помощью современных компьютерных программ. В качестве примера рассмотрена математическая модель индукционно-динамического механизма без магнитопровода и с ферромагнитным магнитопроводом. Даны количественные и качественные оценки полученных результатов.*

### ВВЕДЕНИЕ

Расчеты индукционно-динамических механизмов (ИДМ), наряду с расчетами электромагнитных механизмов, являются наиболее типичной и наиболее сложной задачей электромеханики. Сложность задачи заключается в необходимости решения триединой (мультифизической) задачи, учитывающей процессы происходящие в электрической цепи, механической системе и электромагнитном поле. Наибольшую сложность представляет расчет электромагнитного поля в случае, если диск механизма является сплошным токопроводящим телом, а составной частью индуктора является незамкнутый ферромагнитный магнитопровод. В этом случае любое приближенное решение задачи (без расчета электромагнитного поля на основании уравнений Максвелла) будет настолько неточным, что само решение теряет всякий смысл.

В настоящей статье рассмотрен расчет ИДМ в наиболее полной постановке задачи с использованием современных программных комплексов, а так же проведен анализ влияния ферромагнитного магнитопровода на работу ИДМ. Решение данной задачи актуально, так как общие принципы решения данной задачи лежат в основе расчета большого количества разнообразных электромеханических систем.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Провести расчет ИДМ с подвижным элементом в виде проводящего диска при условиях: катушка индуктора намотана проводом с заданным числом витков; масса движущихся элементов зависит от координаты (удар о неподвижное тело с последующим совместным движением); источником энергии системы является накопительный конденсатор; противодействующая сила постоянна по величине и направлению (хотя может зависеть от координаты); магнитопровод выполнен в виде цилиндра с центральным магнитопроводом из ферромагнитного материала с малыми потерями на гистерезис и вихревые токи.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Общий вид расчетной системы и ее размеры показаны на рис. 1. В данной задаче диск не моделируется как отдельная область, перемещающаяся на деформирующейся сетке. Вместо этого на неподвижной сетке задается движение проводящей области, шири-

на которой равна толщине диска. Такая постановка задачи позволяет избежать инвертирования ячеек сетки, значительно упрощая и ускоряя расчетный процесс не ухудшая точность модели. Ширина области движения диска составляет 15 мм (см. рис. 1), а толщина диска – 5 мм. Такое распределение проводимости может быть задано экспоненциальной функцией, отличной от нуля в области, имитирующей движущийся диск и практически равной нулю в остальной области (см. рис. 2).

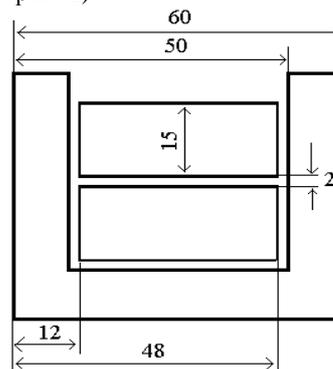


Рис. 1 – Расчетная модель ИДМ

D1	0 если $D \in D1$
D2	$\sigma$ если $D \in D2$
D1	0 если $D \in D2$

Рис. 2 – Значение проводимости в зависимости от принадлежности к той или иной области

На основании закона Максвелла – Ампера значение векторного магнитного потенциала можно записать:

$$\sigma \cdot \frac{\partial A_{\phi}}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \cdot \nabla \times A_{\phi}) = J_{\phi} \quad (1)$$

В (1) используются общепринятые обозначения не нуждающиеся в расшифровке.

Так как катушка намотана равномерно распределенным по ее сечению проводом, то пренебрегая неравномерностью тока в отдельном проводящем витке для электрической цепи можно записать уравнение:

$$L \cdot \frac{d^2 q}{dt^2} + R \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{W}{S} \cdot \iiint_V \frac{\partial A_{\phi}}{\partial t} \cdot dV = U_c - \frac{q}{C} \quad (2)$$

где  $L$  – индуктивность внешней цепи;  $R$  – суммарное активное сопротивление цепи;  $C$  – емкость конденсатора;  $W$  – число витков катушки;  $S$  – площадь поперечного сечения катушки;  $V$  – объем катушки;  $q$  – электрический заряд;  $U_c$  – начальное напряжение на емкости.

Полученная система уравнений (1,2) должна быть дополнена уравнением движения диска:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(m(z) \cdot v) = Q - P(z) \\ \frac{dz}{dt} = v \end{cases} \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой уравнение Мещерского (динамика тела с переменной массой), где  $m(z)$  – масса, зависящая от координаты;  $v$  – скорость;  $Q$  – электромагнитная сила;  $P(z)$  – противодействующая сила;  $z$  – координата положения диска.

В (3)  $m(z)$  представляет собой почти ступенчатую функцию (время удара о покоящуюся часть принимается равным величине порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  с):

$$m(z) = \begin{cases} m_1, z < z_1 \\ m_1 + m_2, z \geq z_1 \end{cases} \quad (4)$$

где  $z_1$  – координата нахождения тела с массой  $m_2$ .

Электромагнитная сила определяется выражением:

$$Q = \iiint_V (\vec{J}_d \times \vec{B}) \cdot dV, \quad (5)$$

где  $J_d$  – плотность наведенного тока в диске.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

В качестве основных исходных было принято значение напряжения на конденсаторе – 800 В; значение емкости – 100 мкФ; число витков индуктора – 100; начальная сила поджатия диска – 10 Н; массы движущихся и неподвижных частей и т.д. Для ферромагнитного сердечника задавалось значение относительной магнитной проницаемости от величины магнитной индукции (см. рис. 3). Необходимо отметить, что это один из многих возможных способов задания свойств материала. В процессе расчета ИДМ с ферромагнитным сердечником в качестве задаваемого свойства материала было значение удельной проводимости равной  $2,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , которая определялась на основании мощности потерь в ферромагнетике, что позволяет учитывать вихревые токи в магнитопроводе.

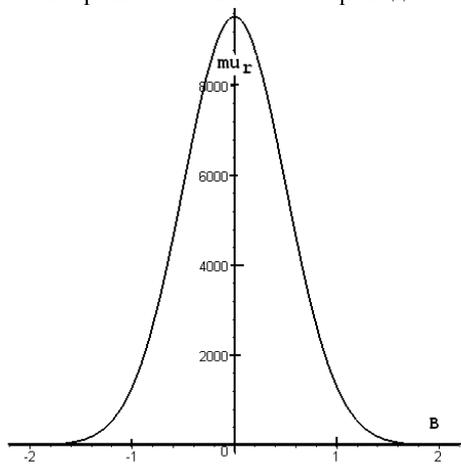


Рис. 3 – Кривая относительной магнитной проницаемости

#### РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Поставленная задача была решена прикладной программой COMSOL, в которой в специальном разделе были смоделированы области представляющие ИДМ (см. рис. 1) в осесимметричной системе координат и окружающее пространство с соответствующими свойствами для решения уравнения (1). В разделе Global Equations были записаны уравнения (2, 3). Так как наличие ступенчатых функций (функция Хевисайда) и Дельта функций (функция Дирака) приводят к неустойчивости в решении задачи, то в модели эти функции были заменены на специальные функции, имеющие сглаженную границу в области перехода и непрерывную первую или вторую производные.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В процессе расчета были решены две задачи с одинаковыми входными параметрами: моделирование ИДМ с ферромагнитным магнитопроводом; моделирование ИДМ без ферромагнитного магнитопровода. Расчет проводился для фиксированного значения времени – 0,9 мс. На рис. 4 показана зависимость хода подвижного диска от времени.

На рис. 5 показана зависимость тока в катушке ИДМ для двух расчетных вариантов (с ферромагнитным сердечником и без такового). На рис. 6 показаны значения электромагнитной силы, действующей на подвижный элемент механизма. На рис. 7 показаны значения противо-ЭДС, наводимой в катушке в соответствии с законом Фарадея.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

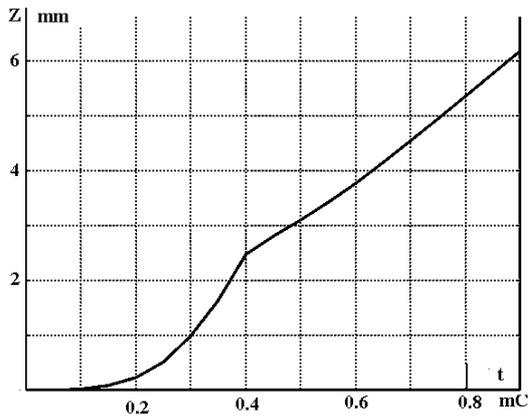
1. Как следует из рис.4, наличие магнитной системы мало влияет как на скорость, так и на путь подвижного элемента в пределах расчетных времен. Так, расстояние в 2,5 мм подвижный элемент проходит за время 0,4 мс вне зависимости от наличия магнитной системы и лишь к концу хода различие в ходе достигает значения в 1 мм. Это явление можно легко объяснить, если проанализировать картину магнитного поля в магнитопроводе, показанную на рис. 8 через время 0,05 мс от начала процесса.

Как следует из рис. 8 в магнитопроводе имеет место явно выраженный магнитный поверхностный эффект, т.е. независимо от размеров магнитопровода, весь поток сосредоточен на внутренней границе, а магнитная индукция достигает величины 1,6 – 1,8 Тл. Из чего можно заключить, что в начальные моменты процесса магнитопровод не оказывает существенное влияние на движение диска. Но по мере увеличения времени, поток распределяется по сечению более равномерно (уменьшается степень насыщения магнитопровода), что сказывается на характере движения диска.

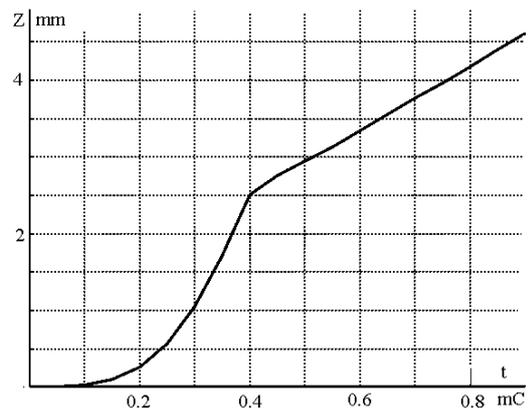
Необходимо отметить, что за счет вихревых токов в магнитопроводе распределение индукции имеет сложный вид.

2. Наличие магнитопровода уменьшает амплитуду тока в катушке рис. 5 и увеличивает время разряда конденсатора за счет увеличения значения индуктивности системы с магнитопроводом.

3. Наличие магнитопровода несколько увеличивает значение максимальной электромагнитной силы, действующей на диск и изменяет ее форму, увеличивая импульс силы.

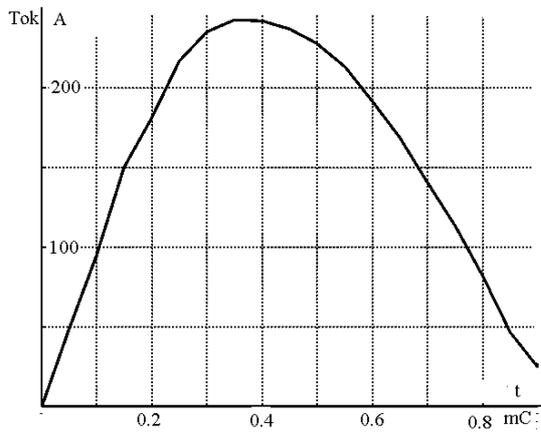


а) ИДМ с ферромагнитным магнитопроводом

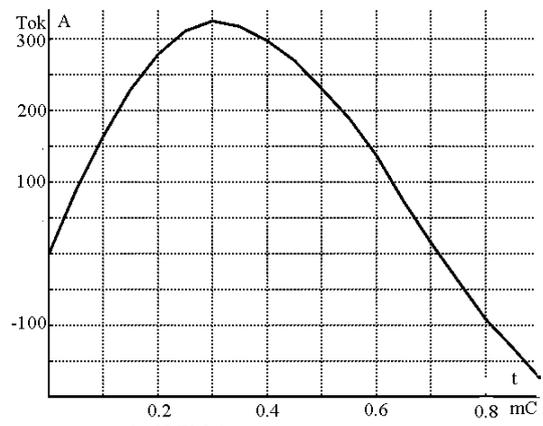


б) ИДМ без магнитопровода

Рис. 4 – Зависимость хода подвижного элемента от времени

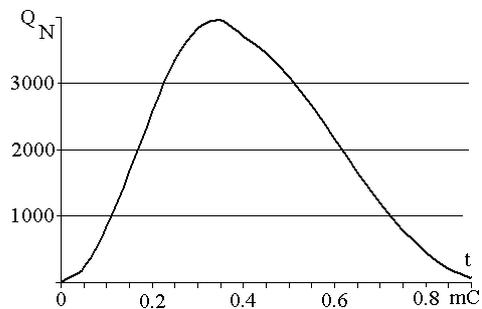


а) ИДМ с ферромагнитным магнитопроводом

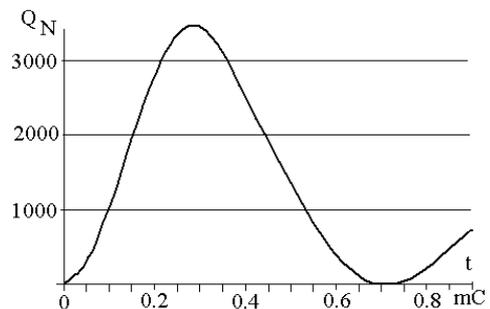


б) ИДМ без магнитопровода

Рис. 5 – Зависимость тока в индукторе ИДМ

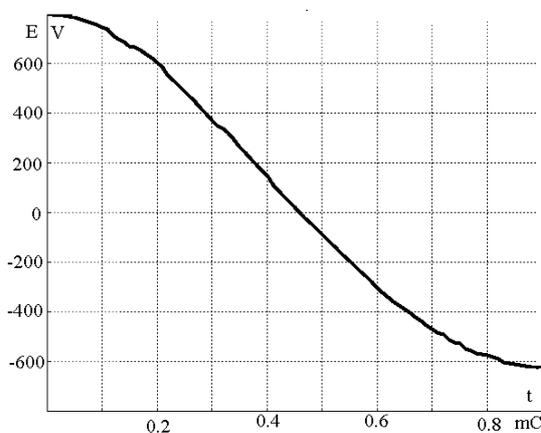


а) ИДМ с ферромагнитным магнитопроводом

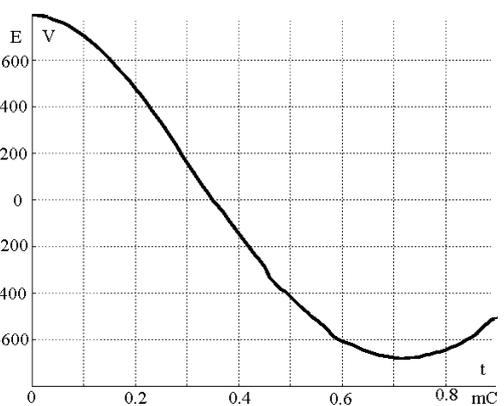


б) ИДМ без магнитопровода

Рис. 6 – Зависимость электромагнитной силы, действующей на подвижную часть ИДМ



а) ИДМ с ферромагнитным магнитопроводом



б) ИДМ без магнитопровода

Рис. 7 – Противо-ЭДС, действующая в катушке



Рис. 8 – Индукция в магнитопроводе

Расчеты показывают, импульс силы  $0,9 \text{ мС}$

$$p = \int_{t=0} Fz(t) \cdot dt \text{ для системы с магнитопроводом равен}$$

1,8 Н·с, а для системы без магнитопровода – 1,2 Н·с.

4. Распределение плотности наведенных токов в диске имеет сложный характер и существенно меняется со временем. На рис. 9 показано распределение плотности тока по толщине диска в момент времени 0,9 мС.

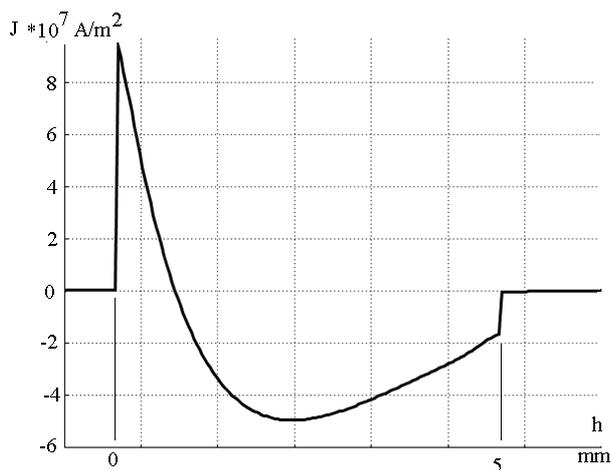


Рис. 9 – Распределение плотности тока по толщине диска через 0,9 мС

На рис. 10 показана зависимость тока диска от времени для системы с магнитопроводом.

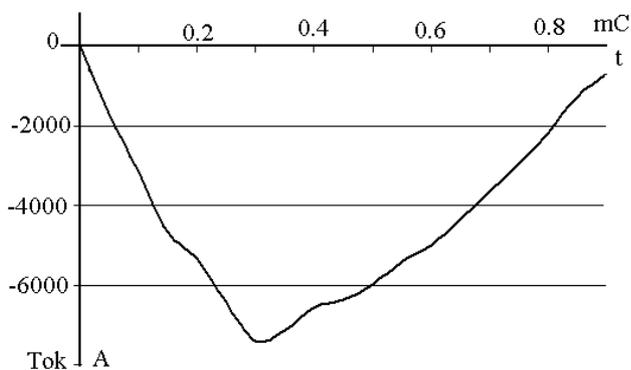


Рис. 10 – Ток диска для системы с магнитопроводом

В заключение был проведенный тепловой расчет катушки и диска в адиабатическом режиме для определения степени нагрева диска и индуктора в процессе работы.

## ВЫВОДЫ

1. Наличие магнитопровода слабо сказывается на динамике движения подвижного элемента, если время процесса имеет порядок 1 мС, это может быть объяснено электромагнитным поверхностным эффектом, при котором в начальные моменты времени весь поток магнитопровода сосредоточен в относительно тонком слое, а ферромагнетик в этих областях находится в насыщенном состоянии.

2. Ферромагнитный магнитопровод несколько уменьшает максимальное значение тока индуктора и увеличивает время разряда за счет привносимой в электрическую цепь дополнительной индуктивности.

3. Ферромагнитный магнитопровод изменяет форму электромагнитной силы, действующей на диск и несколько увеличивает действующий на диск импульс силы. Распределение объемных сил, действующих внутри диска существенно неравномерно и по характеру напоминает график распределения плотности тока в диске см. рис. 9.

4. При расчетах электрической цепи нет необходимости искусственно вводить индуктивность рассеяния катушки, так как в процессе расчета электромагнитного поля методом конечных элементов эта составляющая учитывается автоматически.

5. Проведенные расчеты показывают, что при временах разряда конденсатора порядка 1 мС интеграл Джоуля невелик. В соответствие с этим увеличение температуры диска и катушки за время работы ИДМ будет составлять десятки доли градуса и поэтому может не приниматься во внимание.

Поступила 14.07.2009

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.,  
Национальный технический Университет  
"Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ "ХПИ",  
кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (057) 707-69-76, факс (057) 707-66-01,  
e-mail: eie@kpi.kharkov.ua

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА С РАЗЛИЧНЫМИ ИНДУКТОРАМИ

*Експериментально і теоретично досліджені шість різних індукторів ударного електромеханічного перетворювача індукційного типу, який збуджується від полярного ємнісного накопичувача. Визначені закономірності впливу основних параметрів індуктора на електричні, механічні та теплові показники при різних режимах роботи перетворювача. На основі запропонованих критеріїв виконана оцінка ефективності індуктора та запропоновані практичні рекомендації. Отримано задовільну відповідність між розрахунковими та вимірними параметрами.*

*Експериментально и теоретически исследованы шесть различных индукторов ударного электромеханического преобразователя индукционного типа, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя. Установлены закономерности влияния основных параметров индуктора на электрические, механические и тепловые показатели при различных режимах работы преобразователя. На основе предложенных критериев выполнена оценка эффективности индуктора и предложены практические рекомендации. Получено удовлетворительное соответствие между расчетными и измеренными параметрами.*

### ВВЕДЕНИЕ

Ударные электромеханические преобразователи индукционного типа (УЭПИ) широко применяются для создания мощных силовых импульсов, воздействующих на различные материальные объекты во многих отраслях промышленности и науки [1-3]. В этих преобразователях при импульсном возбуждении неподвижного индуктора от емкостного накопителя в близко расположенном электропроводящем якоре индуцируется ток, взаимодействие которого с магнитным полем индуктора создает электродинамическую силу, отталкивающую якорь от индуктора.

Однако такие преобразователи характеризуются относительно низкой эффективностью преобразования электрической энергии в механическую [4, 5]. Одним из ключевых элементов УЭПИ является индуктор, во многом определяющий его конструкцию, конфигурацию, скоростные и силовые показатели якоря, величину и скорость нарастания тока возбуждения, тепловые режимы и массо-габаритные показатели.

Индуктор характеризуется целым рядом как конструктивных (табл. 1), так и технологических параметров (степень чистоты и состояния медного провода, материал, условия и плотность пропитки, качество укладки и изгибов провода, параметры и состояние изоляции и др.).

Математические модели УЭПИ, как правило, представляют индуктор в идеализированном виде. Поэтому особый интерес представляют экспериментальные исследования УЭПИ с различными индукторами, что позволяет реально установить основные закономерности и оценить степень адекватности математических моделей.

Актуальность задачи состоит в том, что до настоящего времени комплексные экспериментально-теоретические исследования УЭПИ с различными индукторами не проводились.

Целью статьи является выявление закономерностей влияния параметров индукторов на основные электрические, механические и температурные показатели УЭПИ дисковой конфигурации.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены схема и общий вид экспериментальной установки, в которой установлен индуктор №1 (см. табл. 1). Установка содержит неподвижный индуктор 1, который прикреплен к неметаллической (гетинаксовой) пластине 4 и возбуждается аperiodическим импульсом при подключении к емкостному накопителю. К массивному медному якору 2 прямоугольной формы присоединена ударная стальная пластина 3, которая воздействует на боек 8, совершающий удары по верхней упорной пластине 5. Стальная пластина 3 выполнена с отогнутыми вверх направляющими ребрами. Гетинаксовая пластина 4 с УЭПИ крепится между двумя массивными стальными плитами 5 с помощью опорных штырей 6 бойком вверх. Пружина 7 обеспечивает заданную силу противодействия движению и осуществляет возврат якоря 2 с ударной пластиной 3 в исходное положение до тесного контакта с индуктором по окончании рабочего цикла при любом пространственном положении преобразователя.

При разряде емкостного накопителя в индукторе протекает импульс тока  $i_1$ , который наводит ток  $i_2$  в якоре, что приводит к возникновению между ними электродинамической силы

$$f_z(t, z) = i_1(t)i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z), \quad (1)$$

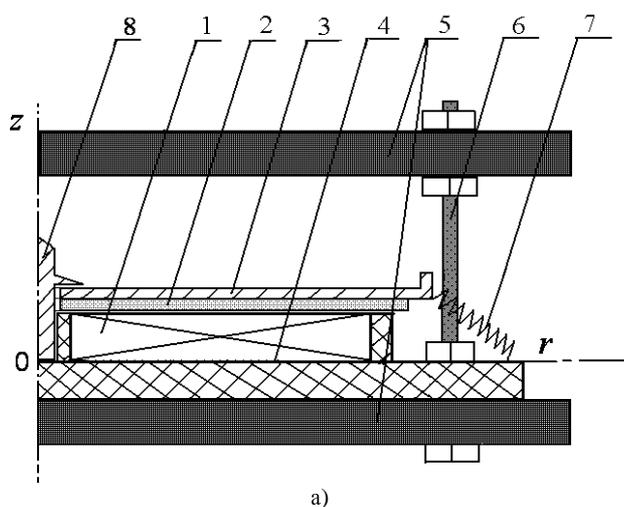
где  $M_{12}$  – взаимоиנדуктивність індуктора і якоря, зависящая от перемещения якоря относительно индуктора вдоль оси  $z$ .

С учетом противодействующих сил упругости пружины  $f_{pr}$ , силы тяжести  $f_g$  и аэродинамического сопротивления  $f_a$  на вертикально перемещаемый якорь действует результирующая сила:

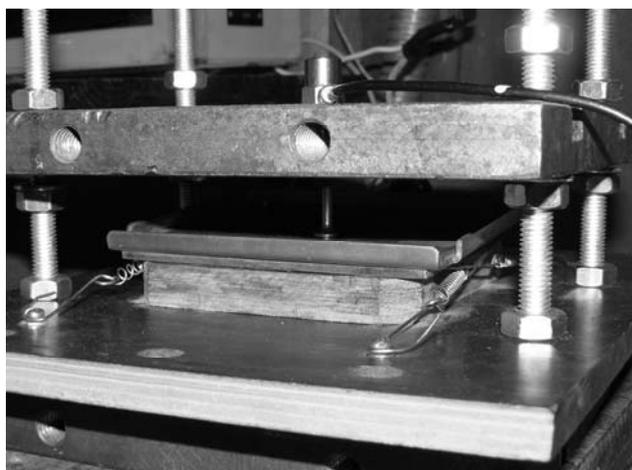
$$\begin{aligned} f_{rez}(t, z) &= f_z(t, z) - f_{pr}(z) - f_g - f_a(V) = \\ &= i_1(t)i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z) - K_p \cdot \Delta Z(t) - g \sum_k m_k - \\ &\quad - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t), \end{aligned} \quad (2)$$

Основные параметры индукторов

Параметр	Номер индуктора					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
Внешний диаметр индуктора $D_{ex1}$ , мм	120	120	100	110	100	110
Внутренний диаметр индуктора $D_{in1}$ , мм	10	10	10	10	10	10
Высота индуктора $H_1$ (меди), мм	7	15	10	13	10	26
Сечения витка (шины) $S = a \times b$ , мм <sup>2</sup>	2×7	2×7	1,8×4,8	3×13	1,8×4,8	3×13
Количество витков индуктора $N_1$ , шт	13	27	42	11	42	20
Число рядов обмотки $J$ , шт	1	2	2	1	2	2
Масса меди в индукторе $m_0$ , кг	0,31	0,69	0,61	0,71	0,61	1,26
Активное сопротивление $R_1$ , мОм	3,3	6,9	16,1	0,9	16,1	1,6
Индуктивность $L_1$ , мкГн	7,9	30,8	79,3	4,66	85,4	12,4
Постоянная времени $\tau = L_1 / R_1$ , мс	2,39	4,46	4,93	5,18	5,30	7,75
Степень пропитки связующим	точечная	точечная	полная	точечная	полная	точечная
Корпус	-	-	пластик	-	сталь	-
Полная масса индуктора $m_{ind}$ , кг	0,33	0,73	0,75	0,74	1,68	1,31



а)



б)

Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки

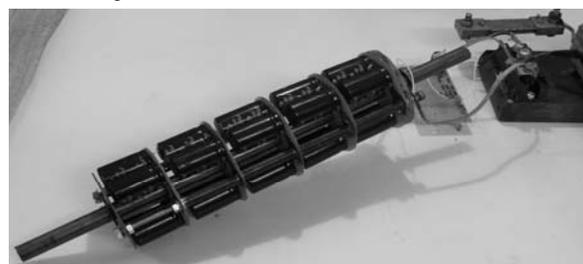
где  $K_p$  – коэффициент упругости пружины;  $\Delta Z(t)$  – величина перемещения якоря;  $g$  – ускорение свободного падения;  $m_k$  – масса  $k$ -го ускоряемого элемента;  $\gamma_a$  – плотность воздуха;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $V$  – скорость якоря;  $D_{ex2}$  – эффективный размер ударной пластины.

Импульс силы  $FI$ , действующий на якорь, определяется значением интеграла:

$$FI = \int_0^t f_{rez}(t, z) dt. \quad (3)$$

К верхней массивной стальной плите 5, которая ограничивает движение бойка, сверху подсоединен пьезоэлектрический виброизмерительный преобразователь ДН-4-М1 (рис. 1, б). Он осуществляет преобразование механических колебаний, возникающих при ударе бойка о верхнюю стальную плиту, в электрические сигналы, передавая их в измеритель шума и вибрации ВШВ-003. Последний преобразует электрические сигналы в величины виброускорения  $a_f$  и виброскорости  $v_f$ . Кроме того, при помощи измерительного шунта осуществляется регистрации тока в индукторе. Таким образом, экспериментальная установка позволяет измерять ток в индукторе и вибрацию верхней стальной плиты при помощи электронного осциллографа RIGOL DS 522M.

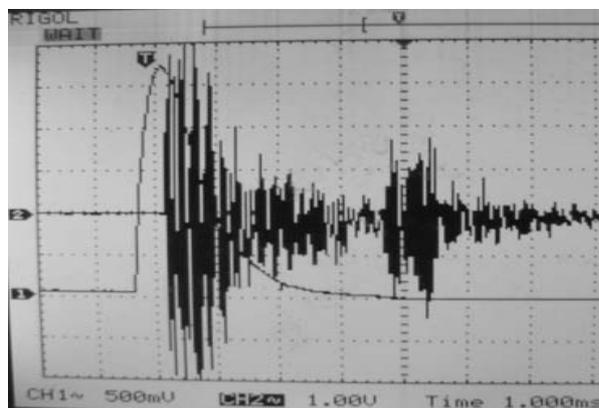
При экспериментальных исследованиях использовались электролитические конденсаторы  $HJ$  (*snap-in terminal type, miniaturized series*) с предельным напряжением  $U_0 = 450$  В и емкостями  $C = 150$  и  $330$  мкФ. Конденсаторы комплектовались в батареи общей емкостью  $C = 6 \times 330 = 1980$  мкФ;  $C = 19 \times 150 = 2850$  мкФ;  $C = 6 \times 330 + 19 \times 150 = 4830$  мкФ и  $C = 20 \times 330 = 6600$  мкФ (рис. 2).

Рис. 2. Общий вид емкостного накопителя ( $C = 20 \times 330 = 6600$  мкФ) с токовым шунтом

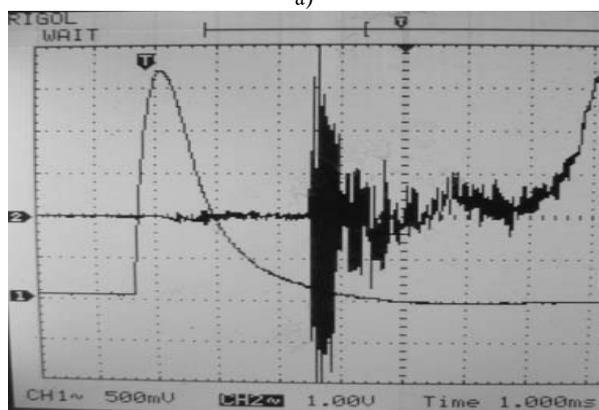
Поскольку емкостной накопитель комплектовался электролитическими конденсаторами, в системе

возбуждения индуктора электронным образом формировался аperiодический импульс тока [6].

На рис. 3 представлены осциллограммы тока в индукторе  $i_1$  и виброускорения  $a_f$ , а на рис. 4 – тока  $i_1$  и виброскорости  $v_f$  при использовании емкостного накопителя  $C = 4000$  мкФ,  $U_0 = 300$  В и различных расстояниях от бойка до упора  $Z_{end}$  (индуктор №3).



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы тока в индукторе (канал CH1) и виброускорения (канал CH2) при:  
а)  $Z_{end} = 0$  мм; б)  $Z_{end} = 10$  мм

При заданном расстоянии до пластины  $Z_{end}$  можно вычислить среднюю скорость якоря на участке движения:

$$V_{cp} = \frac{Z_{end}}{t_{зап} - t_{зап0}}. \quad (4)$$

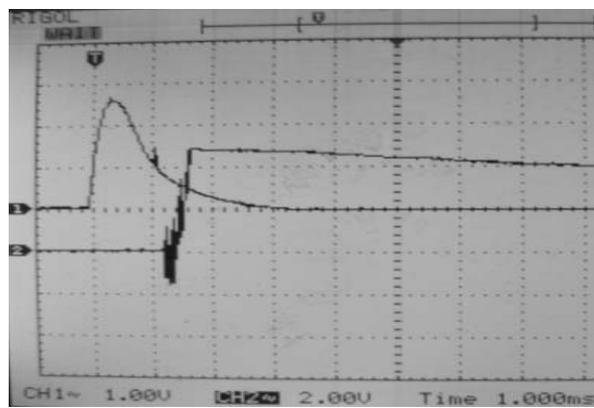
Таким образом, зная характеристики измерительного шунта, прибора ВШВ-003 и шкалы осциллографа при экспериментальных исследованиях определяются:

- форма и амплитудное значение тока индуктора  $i_{1m}$ ;
- амплитудные значения виброускорения  $a_{fm}$  и виброскорости  $v_{fm}$ ;
- время достижения током максимального значения – (длительность фронта импульса)  $t_{фр}$ ;
- полная длительность токового импульса  $t_{имп}$ ;
- время запаздывания между началом вибрационных и электрических процессов  $t_{зап}$ ;
- средняя скорость якоря  $V_{cp}$  с разгоняемыми элементами.

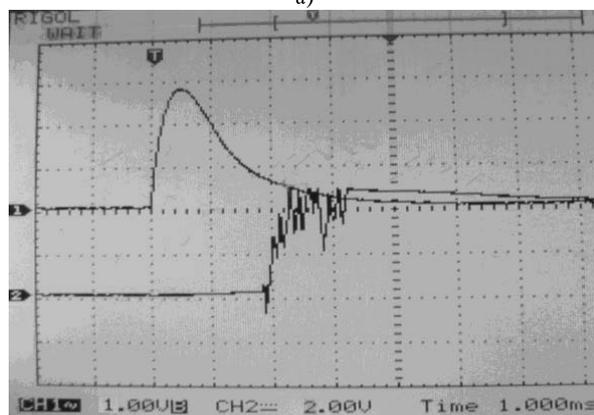
Экспериментально определенные параметры сравнивались с рассчитанными теоретически по известной математической модели [7].

Как видно, начало вибраций возникает в пластине с некоторым запаздыванием  $t_{зап0}$  по отношению к началу тока в индукторе, даже если ход якоря равен нулю.

При увеличении хода якоря возрастает и интервал запаздывания  $t_{зап}$ , так как якорю требуется некоторое время, чтобы, разогнавшись, достигнуть верхней упорной пластины.



а)



б)

Рис. 4. Осциллограммы тока в индукторе (канал CH1) и виброскорости (канал CH2) при:  
а)  $Z_{end} = 2,5$  мм; б)  $Z_{end} = 5,0$  мм

#### ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ИНДУКТОРОВ

Испытывались шесть различных индукторов, обозначенных номерами №1 – №6 (рис. 5). Их основные параметры приведены в табл. 1.

Большому порядковому номеру индуктора соответствует большее значение параметра  $\tau = L_1 / R_1$ , где  $L_1$  – индуктивность индуктора,  $R_1$  – его сопротивление.

Все индукторы имеют дисковую форму и намотаны медной шиной с различной плотностью укладки. Для индукторов №1, №2, №4, №6 (рис. 5а,б,г,е) использована точечная (не полная) пропитка витков связующим эпоксидным материалом. При этом улучшается отвод тепла от обмотки, но ухудшаются механические и конструктивные свойства индуктора.

Индукторы №3 и №5 (рис. 5в,д) полностью пропитаны связующим материалом и размещены в корпусе, охватывающем обмотку с наружной боковой и нерабочей (необращенной к якорю) торцевой сторон. Эти индукторы имеют одинаковую обмотку, но различный корпус: изоляционный (стеклотекстолитовый) и ферромагнитный (стальной).

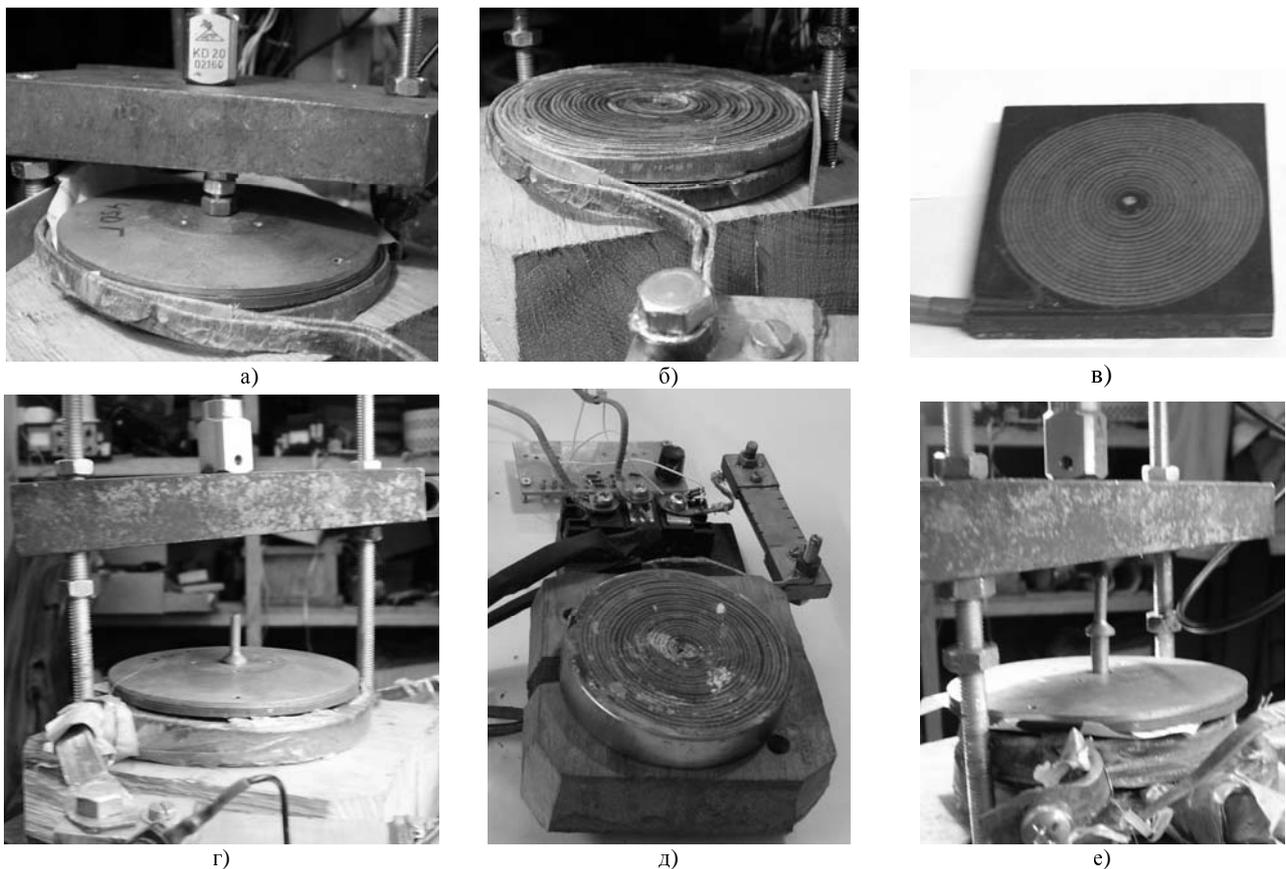


Рис. 5. Общий вид индуктора: а) №1; б) №2; в) №3; г) №4; д) №5; е) №6

#### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УЭПИ С РАЗЛИЧНЫМИ ИНДУКТОРАМИ

В проведенных экспериментах использовался якорь и скрепленная с ним стальная пластина круглой формы (рис. 5а,г,е). При этом индуктор крепился к массивному деревянному основанию.

Рассмотрим средние скорости  $V_{cp}$  (4), приобретаемые якорем при возбуждении индукторов УЭПИ от батареи конденсаторов емкостью  $C = 2850$  мкФ, заряженной до напряжения  $U_0 = 400$  В. Скорость якоря возрастает только на ограниченном расстоянии от индуктора (приблизительно до 10 мм), где осуществляется эффективное электродинамическое взаимодействие с индуктором. В последующем с увеличением расстояния от индуктора скорость якоря практически не растет и начинает снижаться из-за противодействующих сил. Отметим, что в целом экспериментальные данные (рис.6а) удовлетворительно согласуются с расчетными (рис. 6б), что позволяет судить об их адекватности.

На рис. 7 представлены экспериментальные (черные столбцы) и расчетные (светло-серые столбцы) данные по максимальному значению тока в индукторе  $i_{1max}$  (рис. 7а) и максимальной скорости нарастания тока в цепи индуктора (рис. 7б)

$$dvi_{max} = (di_1/dt)_{max} \approx i_{1max}/t_{фр}.$$

Заметим, чем больше указанные параметры, тем ниже надежность УЭПИ, поскольку требуется более сложное и дорогостоящее электронное оборудование

для системы возбуждения преобразователя. С этой точки зрения наиболее предпочтителен индуктор №3, а менее предпочтителен – индуктор №4.

Поскольку экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетными, это позволяет включить в перечень анализируемых параметров рассчитанные величины силы  $f_{rez}$  и максимального импульса силы  $FI_{max}$ , действующих на якорь (рис. 8). При этом экспериментально показано, что измеренная величина виброускорения  $a_f$  прямо пропорциональна величине силы  $f_{rez}$ , а измеренная величина виброскорости  $v_f$  – величине импульса силы  $FI_{max}$ . Полученные из экспериментов величины  $f_{rez}$  и импульс силы  $FI_{max}$  соотносятся с соответственными расчетными показателями с точностью 4...19 %.

Как следует из рис. 8, несмотря на одинаковую энергию емкостного накопителя, в зависимости от применяемого индуктора проявляются существенные различия в характере силы  $f_{rez}$ , действующей на якорь, и величине импульса силы  $FI_{max}$ . С точки зрения обеспечения максимальной величины импульса силы также наиболее предпочтителен индуктор №3, а менее предпочтителен – индуктор №4.

Проанализируем взаимосвязь между геометрическими параметрами и силой воздействия на якорь на примере индукторов №1 и №2. Последний фактически состоит из двух близкорасположенных и соединенных электрически последовательно и согласно по магнитному полю индукторов №1.

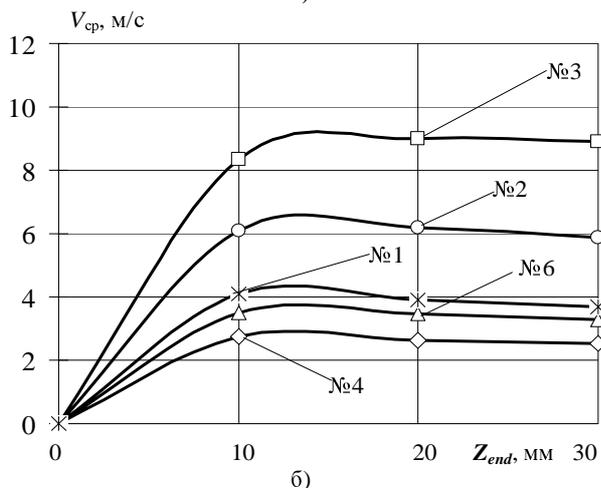
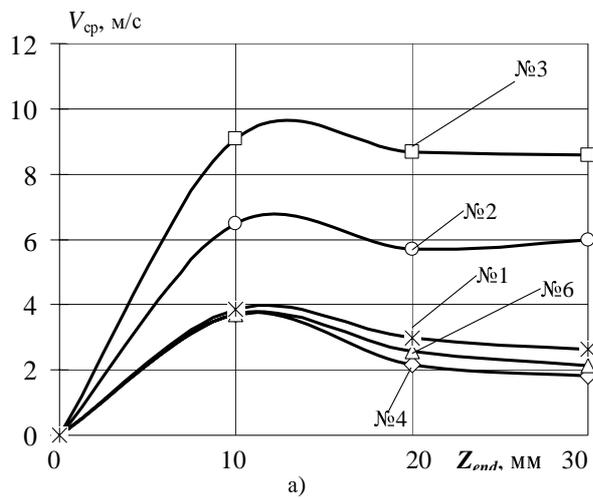


Рис. 6. Экспериментальные (а) и расчетные (б) средние скорости якоря для УЭПИ с различными индукторами

Индуктор №2 по сравнению с индуктором №1 характеризуется (табл. 1, рис. 8):

- увеличенными активным сопротивлением  $R_1$  и индуктивностью  $L_1$ , что снижает максимальное значение тока  $i_{1max}$ ;
- увеличенными длительностью фронта  $t_{фр}$  и полной длительностью импульса  $t_{имп}$ ;
- меньшей величиной силы  $f_{рез}$ , но более длительным ее воздействием;
- повышенной величиной импульса силы  $FI_{max}$ .

Аналогично изменяется характер воздействия индуктора на якорь и при сравнении индуктора №4 (11 витков, 1 ряд) и №6 (20 витков, 2 ряда). Таким образом, при увеличении числа витков путем добавления второго ряда обмотки в индукторе увеличивается импульс силы  $FI_{max}$ .

На базе сравнительного анализа однорядных индукторов №1 и №4, а также двухрядных индукторов №2 и №6 можно сделать вывод: увеличение числа витков индукторов и уменьшение их высоты до определенных величин позволяет повысить эффективность работы УЭПИ.

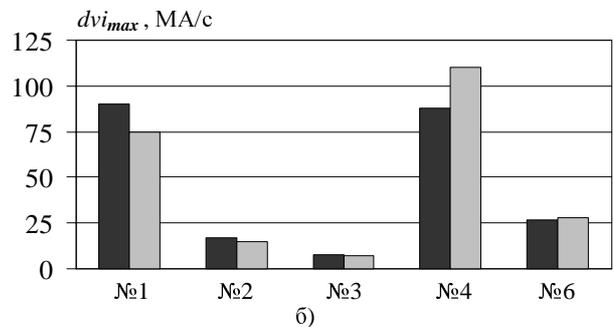
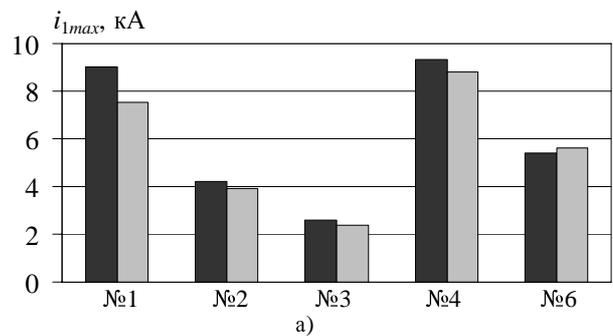


Рис. 7. Экспериментальные (черные столбцы) и расчетные (светло-серые столбцы) параметры УЭПИ с различными индукторами

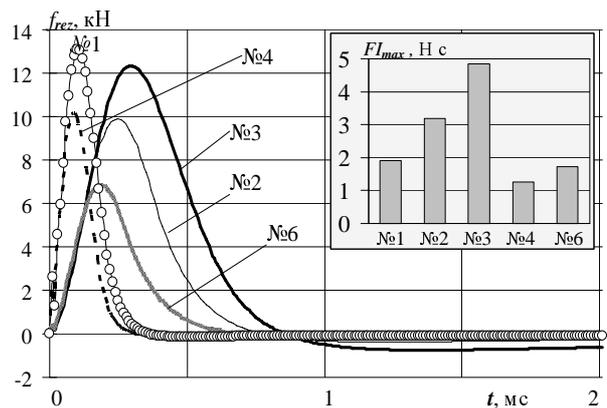


Рис. 8. Силы  $f_{рез}$  и импульсы силы  $FI_{max}$ , действующие на якорь УЭПИ с различными индукторами

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ УЭПИ

Очевидно, что с увеличением емкости  $C$  возрастает энергия источника, что приводит к увеличению импульса силы  $FI_{max}$  и скорости  $V_{cp}$  (рис. 9, 10). Однако указанный рост  $FI_{max}$  происходит по-разному для различных индукторов. Так, при увеличении емкости  $C$  от 1980 до 4830 мкФ величина  $FI_{max}$  увеличивается для индуктора №2 на 103%, а для индуктора №3 всего на 70%. Подобный характер изменения  $FI_{max}$  объясняется следующим: более эффективный индуктор №3 сообщает якорю большую скорость, нежели индуктор №2, что приводит к более быстрому выходу якоря из зоны сильного взаимодействия с индуктором. Поэтому при увеличении емкости накопителя в индукторе №3 добавленная энергия источника (за счет увеличения емкости) менее эффективно используется, чем и индукторе №2.

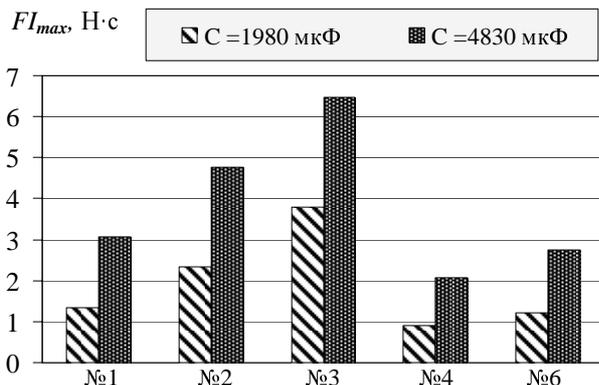


Рис. 9. Импульсы силы  $FI_{max}$  УЭПИ с различными индукторами

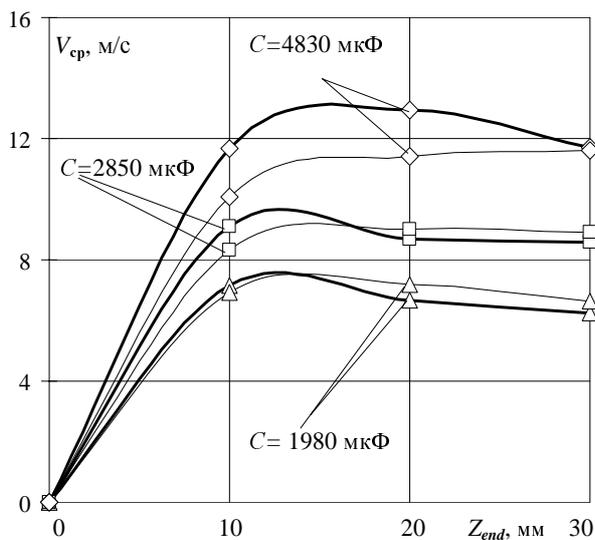


Рис. 10. Экспериментальные (жирные линии) и рассчитанные (тонкие линии) средние скорости якоря УЭПИ с индуктором №3

Сравним значение импульсов силы  $FI_{max}$ , сообщенных фиксированному (заторможенному) и свободному (движущемуся) якорю при разных емкостях  $C$  источника. Фиксированный якорь обладает неизменным и максимальным значением взаимоиндуктивности  $M_{12}$  с индуктором, поэтому импульс силы  $FI_{max}$  фиксированного якоря является максимальным для данного УЭПИ.

Свободный якорь приобретает меньший импульс силы  $FI_{max}$ , чем фиксированный, причем эта разница возрастает с увеличением емкости накопителя (рис.11). Это объясняется выходом ускоряемого якоря за пределы зоны с высокой магнитной связью с индуктором, в то время как фиксированный якорь имеет неизменную высокую магнитную связь. А с увеличением емкости накопителя скорость выхода свободно-го якоря из указанной зоны возрастает.

Увеличение емкости накопителя  $C$  практически одинаково увеличивает импульс силы любого фиксированного якоря с эффективным магнитным взаимодействием, в отличие от свободного якоря.

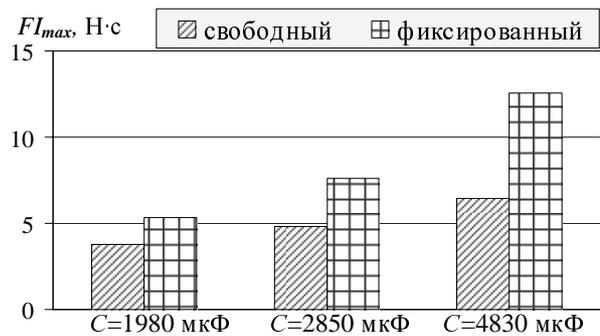


Рис. 11. Величины  $FI_{max}$  для свободного и фиксированного якоря УЭПИ при использовании индуктора №3

Полученный характер изменения импульса силы  $FI_{max}$  указывает на возможность разработки систем форсирования УЭПИ путем удержания якоря вблизи индуктора в первые моменты электромагнитного импульса.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ УЭПИ С ИНДУКТОРОМ В ФЕРРОМАГНИТНОМ КОРПУСЕ

Ферромагнитный (стальной) корпус индуктора (№5) по сравнению с немагнитным (№3) влияет на показатели УЭПИ, а именно:

- является элементом магнитопровода, снижая поля рассеяния и концентрируя их в активной зоне;
- обладает улучшенным теплоотводом;
- более технологичный;
- увеличивает индуктивность индуктора;
- увеличивает потери;
- более массивный;
- требует электрической изоляции.

Часть из этих показателей (первые три) позитивна, а часть (последние три) негативна.

На рис. 12 представлены экспериментальные значения средних скоростей якоря, полученные при использовании индукторов №3 и №5 при возбуждении от емкостного накопителя с напряжением  $U_0 = 400$  В и емкостью  $C = 6600$  мкФ.

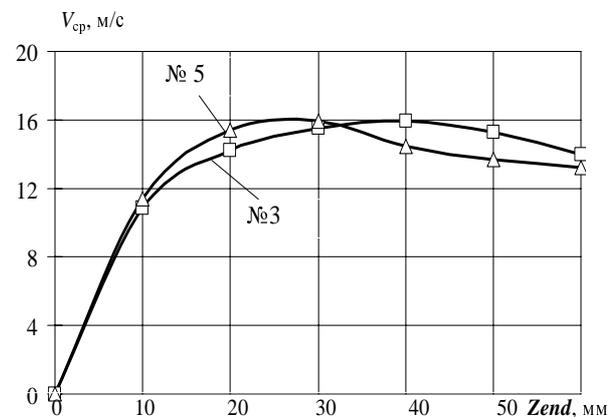


Рис. 12. Экспериментальные скорости якоря УЭПИ с индукторами №5 (стальной корпус) и №3 (стеклотекстолитовый корпус)

Как показали эксперименты в пределах точности измерений скорость якоря практически мало зависит от материала индуктора. Это можно объяснить тем, что влияние на эффективность УЭПИ ферромагнитного корпуса, по сравнению с немагнитным, приводит к появлению как позитивных факторов, например, концентрации магнитных полей в активной зоне и увеличению индуктивности, так и негативных факторов, например, увеличению потерь, что в целом компенсируется.

#### ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИНДУКТОРАХ УЭПИ

Тепловые процессы в индукторе УЭПИ, особенно при циклическом режиме работы, приобретают важное значение, поскольку существенно влияют на механические свойства (размягчение и ослабление связующего материала), стойкость изоляции, а значит и надежность, изменение активного сопротивления, и как следствие, величину тока и силовые показатели. Поэтому одним из этапов экспериментального исследования индуктора УЭПИ является измерение температуры обмотки при циклическом нагружении импульсным током. Измерение температуры проводилось на середине рабочей (обращенной к якорию) торцевой стороне обмотки индуктора при помощи термопары прибора М890G. При этом термопара контактировала с изоляцией шины индуктора, для чего в месте измерения предварительно снимался слой связующего эпоксидного материала (рис. 13).

В процессе измерений на исследуемые индукторы с частотой 0,7 Гц разряжались батареи конденсаторов с напряжением  $U_0 = 400$  В и емкостью в  $C = 1980$  мкФ. Динамика изменения температуры исследуемых индукторов показана на рис. 14.



Рис. 13. Измерение температуры обмотки индуктора термопарой

В процессе испытаний температура обмотки со временем растет, наиболее сильно в индукторе №3, который содержит стеклотекстолитовый каркас и по многим силовым и электрическим показателям был наиболее эффективным. За время 4 мин этот индуктор практически с неизменной скоростью нагревался до

температуры 110°C, при которой эпоксидная смола сильно размягчалась. В то же время температура индукторов №4 и №6 при этих испытаниях была наименьшей (до 40°C) и практически выходила на насыщение. Это свидетельствует о том, что между мощностью тепловыделений и теплоотводом с поверхности у этих индукторов устанавливалось динамическое равновесие.

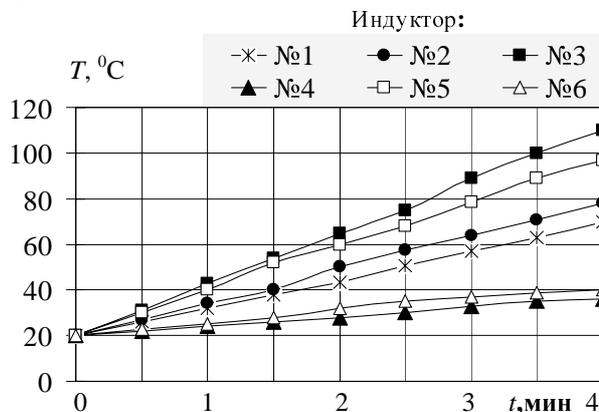


Рис. 14. Динамика изменения измеренной температуры обмотки индукторов

Можно также отметить позитивное влияние стального корпуса (индуктор №5) по сравнению со стеклотекстолитовым (индуктор №3). Обмотка индуктора №5 за 4 мин нагревается на 13°C меньше и при необходимости для нее можно организовать эффективный теплосъем, например при помощи воды, с наружной поверхности.

Таким образом, однозначно судить о преимуществах конкретного индуктора затруднительно, поскольку его эффективность можно оценивать с различных сторон.

#### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДУКТОРОВ

Для оценки преимуществ того или иного вида индукторов будем оперировать нормированными показателями: импульса силы  $FI_{\max}^*$ , максимального тока возбуждения  $i_{1\max}^*$ , максимальной скорости нарастания тока  $dvi_{\max}^*$ , суммарной массы  $m_{ind}^*$  и превышения температуры к концу измерения  $\theta_{fin}^*$  ( $\theta = T_{fin} - T_0$ ), где  $T_{fin}$  – конечная температура индуктора;  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  – температура окружающей среды. В качестве базы для нормирования выберем показатели индуктора №3.

Зададимся обобщающим критерием эффективности индуктора  $K_{ind}$

$$K_{ind} = \beta_1 \cdot FI_{\max}^* + \frac{\beta_2}{i_{1\max}^*} + \frac{\beta_3}{dvi_{\max}^*} + \frac{\beta_4}{\theta^*} + \frac{\beta_5}{m_{ind}^*}, \quad (5)$$

где  $\beta_j$  – весовой коэффициент соответствующего показателя.

При этом

$$\sum_{k=1}^4 \beta_k = 1. \quad (6)$$

Обобщающий критерий обуславливает максимальную величину импульса силы и минимальные значения остальных показателей. При этом составляющие обобщающего критерия учитываются в соот-

ветствии с весовыми коэффициентами  $\beta_1 = 0,5$ ,  $\beta_2 = 0,18$ ,  $\beta_3 = 0,15$ ,  $\beta_4 = 0,12$ ,  $\beta_5 = 0,05$ . Показатели УЭПИ с разными индукторами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Критерии эффективности индукторов

№	Нормированные критерии эффективности					
	$FI_{\max}^*$	$i_{l\max}$	$dvi^*$	$\theta^*$	$m_{ind}^*$	$K_{ind}^*$
1	0,35	3,13	13,06	0,56	0,44	<b>0,572</b>
2	0,62	1,62	2,27	0,62	0,97	<b>0,732</b>
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,0</b>
4	0,24	3,65	20	0,18	0,99	<b>0,894</b>
5	1,00	1,00	1,00	0,85	2,24	<b>0,993</b>
6	0,32	2,27	3,52	0,22	1,75	<b>0,856</b>

Наибольшую величину импульса силы и наименьшие токовые показатели обеспечивают индукторы №3 и №5, что относится к их достоинствам. Однако у индуктора №3 наибольшая температура нагрева, что особенно проявляется при циклическом режиме работы, а у индуктора №5 наибольшая масса, что важно для компактных автономных УЭПИ.

Но несмотря на это, максимальными значениями обобщенного критерия  $K_{ind}^*$  характеризуются индукторы №3 и №5, а худшими являются индукторы №1 и №2, не имеющие специального корпуса. Наличие корпуса у индукторов №3 и №5 делает достаточно их конструктивными и технологичными элементами УЭПИ, повышая его надежность и функциональные возможности.

Таким образом, для исследуемого УЭПИ рекомендуется индуктор плотно наматывать медной шиной сечением  $1,8 \times 4,8 \text{ мм}^2$  в два ряда, помещать в изоляционный или стальной каркас и полностью компаундировать эпоксидным клеем.

### ВЫВОДЫ

1. Исследованы шесть индукторов ударного электро-механического преобразователя индукционного типа, имеющие различные геометрические размеры, число витков и сечение провода, степень пропитки и плотность укладки, наличие или отсутствие каркаса.
2. Установлены закономерности влияния основных параметров индуктора на электрические, механические и тепловые показатели при различных режимах работы преобразователя.
3. На основе предложенных критериев выполнена оценка эффективности индукторов и предложены практические рекомендации по их конструктивному выполнению.
4. Наблюдается удовлетворительное соответствие между расчетными и измеренными параметрами, что позволяет в дальнейшем оперировать расчетной моделью для выбора параметров индуктора проектируемого электро-механического преобразователя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. - 2002. - № 11. - С. 24-28.
2. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. - 2005. №12. - С. 52-57.
3. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // Авиационно - космическая техника и технология. - 2007. - №11 (47). - С. 109 - 117
4. А.Г.Гурин, Б.Г.Набока, В.Я.Гладченко, "Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов", *Техн. электродинамика*, № 2, сс. 3-6, 2001.
5. A.Balikci, Z.Zabar, L.Birenbaum et al., "Improved performance of linear induction launchers", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 41, № 1, pp. 171-175, 2005.
6. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя // *Техн. электродинамика*. Тем. выпуск: Проблемы сучасної електротехніки. - 2006. - Ч. 2. - С. 65-70.
7. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Синтез параметров высокоэффективного электро-механического преобразователя ударного действия // *Техн. электродинамика*. Тем. выпуск: Проблемы сучасної електротехніки. - 2008. - Ч. 2. - С. 63-68.

Поступила 26.08.2009

Болух Владимир Федорович, д.т.н., проф.,  
 Рассоха Максим Алексеевич, аспирант  
 Национальный технический университет "ХПИ",  
 кафедра общей электротехники  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
 тел. (057) 70-76-427,  
 e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

Марков Александр Михайлович, ст. науч. сотр.  
 Лучук Владимир Феодосьевич, к.т.н., ст. науч. сотр.  
 Щукин Игорь Сергеевич, к.т.н., доц.  
 ООО Фирма "ТЭТРА, Ltd",  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
 e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ З ПІДВИЩЕНОЮ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕЧНІСТЮ

*Наведено результати досліджень електричної ерозії контактного матеріалу, екологічна безпечність якого підвищена за рахунок вилучення із серійного контактного матеріалу токсичного оксиду кадмію. Електроерозійна стійкість розроблених контактів в 1,5 разів вища ніж у контактів типу КМК-А10м.*

*Приведены результаты исследований электрической эрозии контактного материала, экологическая безопасность которого повышена за счет исключения из серийного контактного материала токсичного оксида кадмия. Электроэрозионная стойкость разработанных контактов в 1,5 раза выше, чем у контактов типа КМК-А10м.*

### ВСТУП. АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

Електромеханічні апарати з контактними комутаційними елементами становлять 90% актуального ринку комутаційних апаратів завдяки вагомим перевагам над апаратами з напівпровідниковими комутаційними елементами (глибина комутації, перевантажувальна здатність, малі втрати енергії, стійкість до коротких замикань, тощо).

Одним із розповсюджених видів комутаційних апаратів і апаратів керування є контактори і пускачі, особливістю роботи яких є велика частота комутації – до 1200 комутацій на годину.

В пусках і контакторах, зокрема, в магнітних пусках типу ПМЕ, ПМА, ПМЛ, ПМ12 застосовуються металокерамічні контакти марки КМК-А10м, які мають в своєму складі містять оксид кадмію (CdO), завдяки якому суттєво збільшується електрична зносостійкість контактів. При цьому слід враховувати, що оксид кадмію, який сам по собі є токсичним інгредієнтом, під дією електричної дуги, що виникає у міжконтактному проміжку електричного апарата в процесі комутації, вже при температурі 900 °C розкладається на кадмій і кисень та при температурі 1559°C сублимує [1], отже потрапляє у навколишнє середовище.

Державні санітарні правила та норми України відносять кадмій та його сполуки до 1-го класу токсично небезпечних речовин, які небезпечні для здоров'я людини [2]. У цьому ж документі зазначається, що оксид кадмію може негативно впливати на бронхолегеневу систему, на шкіру та підшкірну клітковину, на нервову систему, обмін речовин та кровотворну систему.

Згідно з Міждержавним стандартом [3], який нормує загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони середньозмінна гранично допустима концентрація кадмію та його сполук встановлена на рівні 0,01 мг/м<sup>3</sup>, що лише у два рази перевищує гранично допустиму концентрацію таких речовин, як свинець та ртуть, токсичність яких є загальновідомою. Пунктом 4.2.5 даного стандарту встановлюється періодичність контролю шкідливих речовин 1-го класу небезпеки у повітрі робочої зони не рідше 1-го разу на 10 днів. Практика свідчить, що дані параметри далеко не завжди ретельно контролюються на підприємствах, у тому числі й на підприємствах харчової промисловості, де продукти розпаду оксиду кадмію можуть

попаляти у кінцеву продукцію, яка зрештою потрапляє й до споживачів.

Програма Організації Об'єднаних Націй з навколишнього середовища, яка регулює використання хімічних речовин, зобов'язує уряди країн приймати заходи щодо зменшення ризиків для здоров'я людей та довкілля. В лютому 2009 року на 25-й сесії Ради директорів цієї Програми та Глобальному форумі з навколишнього середовища на рівні міністрів [3] був прийнятий стратегічний підхід до міжнародного регулювання хімічних речовин, у тому числі таких, що включають ртуть, свинець і кадмій. В Рішенні 25/5 заключної доповіді даної сесії (п. II, стор. 26) зокрема відзначається, що експорт нових і використаних продуктів, у складі яких є свинець і кадмій, як і раніше створює проблеми для країн, що розвиваються, і країн з перехідною економікою, у яких відсутній достатній потенціал для забезпечення екологічно обґрунтованого регулювання і видалення цих речовин, що містяться в продуктах. Там же зазначається, що потрібно здійснити додаткові заходи для вирішення проблем і завдань, зумовлених дією свинцю та кадмію. Таким чином, проблема заміни оксиду кадмію на матеріали, які не є токсичними, безумовно є актуальною для нашої країни.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Численні дослідження (див. бібліографію в [5]), проведені науковцями у різних країнах, показали можливість застосування в електричних контактах замість оксиду кадмію оксидів інших металів, серед яких особливу увагу дослідників привертає оксид олова.

Композиції срібла з кількістю оксиду олова (SnO<sub>2</sub>) 8, 10, 12% маси в останні роки знаходять все більш широке застосування як контактні матеріали для низьковольтних комутаційних апаратів.

Оксид олова – не токсичний, підвищує твердість композиційного матеріалу порівняно з контактами типу КМК-А10м, за рахунок розташування дрібних частинок SnO<sub>2</sub> всередині зерен срібла. Термодинамічні властивості оксиду олова набагато кращі ніж у оксиду кадмію. Так температура плавлення SnO<sub>2</sub> близько 1900 °C, при якій SnO<sub>2</sub> не розкладається на олово і кисень. Зона плавлення робочої поверхні дугою мала, оскільки температура кипіння SnO<sub>2</sub> становить 2273°C.

Металопереробний завод INMET Інституту кольорових металів у Глівіце (Польща) виготовляє контактний матеріал срібло-оксид олова, де токсичний оксид кадмію замінено екологічно безпечним оксидом олова [6]. Проте, робоча поверхня контактів такого матеріалу зазнає значного окислення при довготривалому проходженні струму. Окислення поверхні призводить до перегріву матеріалу та значного підвищення перехідного опору, що знижує надійність та термін служби апаратів.

#### МЕТА РОБОТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою даної роботи було виявлення закономірностей, що сприяють розробленню матеріалів з більшою екологічною безпечністю та підвищеною зносостійкістю. Зокрема, були проведенні дослідження впливу різних компонентів на якість контактних матеріалів (у першу чергу, стосовно перехідного опору, стійкості до зварювання та зносостійкості), створених на основі срібла та оксиду олова. В результаті цих досліджень було розроблено склад металокерамічного матеріалу для електричних контакт-деталей [7].

В даній роботі приводяться результати досліджень електроерозійної стійкості та контактного опору матеріалу контактів з вилученим токсичним інгредієнтом - оксидом кадмію.

Основним критерієм при виборі інгредієнтів композиційного контактного матеріалу є їх висока термодинамічна стабільність, відсутність хімічної взаємодії з матричним металом (яким у наших дослідженнях є срібло) мала схильність до коалесценції за розчинно-осаджувальним механізмом при високих температурах.

Цим вимогам у значній мірі відповідають термодинамічно стійкі тугоплавкі з'єднання, такі як оксиди, які можуть бути отримані у вигляді порошків різних ступенів дисперсності.

Введення дисперсних частинок оксидів в срібну матрицю підвищує міцність, межу текучості, твердість і температуру рекристалізації, оксиди підвищують дугогасний ефект, перешкоджають зварюванню контактів при комутації струму в нормальних і аварійних режимах.

У металокерамічних композиціях з оксидами електродуговий розряд на поверхні контактів вибірково взаємодіє з частинками інгредієнтів найменш тепло- і електропровідними, викликаючи їх ерозію. Тому електрична дуга переміщується з одного окремо розташованого тугоплавкого включення на інше, внаслідок чого відбувається дисипація енергії дуги і зменшується кількість теплової енергії, яка поглинається матеріалом контактів. При цьому зменшується термоелектронна емісія, що сприяє швидкому згасанню дуги.

Розроблений матеріал включає наступні інгредієнти: 82% мас. Ag + 11,5% мас. SnO<sub>2</sub> + 4% мас. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2% мас. Zr + 0,5% мас. WO<sub>3</sub>. [5]

При комутації струму та довготривалому його проходженню через замкнені контакти магнітних пускачів на робочій поверхні контакту утворюється термостабільний шар SnO<sub>2</sub> з високим питомим опором ( $\rho = 4 \cdot 10^4$  Ом·м), що призводить до перегрівання контактів та зниження їх електроерозійної стійкості.

Запобігання утворенню термостабільного шару забезпечує введення оксиду вольфраму (WO<sub>3</sub>) в кількості 0,5% мас.

Розплавлені частинки WO<sub>3</sub> (T<sub>плав</sub> = 1470 °C) обволікають тверді частинки SnO<sub>2</sub> і утворюють волокнистість розплавленого срібла, де волокнами є частинки SnO<sub>2</sub> покриті WO<sub>3</sub>.

Частинки SnO<sub>2</sub>, які не покриті оксидом вольфраму виштовхуються наверх розплавленим сріблом, де на робочій поверхні створюється термостабільний шар оксиду олова з високим опором протікання струму.

Введення оксиду індію (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) дозволяє рівномірно розподіляти дрібнозернисті оксиди олова в срібній матриці і прискорювати дифузію олова в срібну матрицю при виготовленні контактного матеріалу.

Введення цирконію (Zr) підвищує електроерозійну стійкість контактного матеріалу, за рахунок поглинання кисню із розплавленого срібла при дії електричної дуги, що призводить до зменшення часу горіння дуги та розбризкування рідкого срібла.

Технологія виготовлення дослідних зразків проводилась методами внутрішнього окислення та порошкової металургії. Вихідними матеріалами для дослідження були наступні порошки: Ag (ТУ 48-1-702-77), SnO<sub>2</sub> (ГОСТ 22516-77), In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ТУ 16.09.04.127-74), які змішувались в заданій пропорції в суху. По закінченні змішування добавлявся 3% розчин полівінілового спирту у воді із розрахунку 8 – 10 мл розчину на 100 г маси суміші.

Суміш срібла з оксидами піддавалась відновленню в атмосфері водню. Температура відновлення коливалась в інтервалі 600 – 700 °C, час витримки становив 1 – 2,5 год. Охолоджена суміш протиралась через сито №01. Отримані порошки сплавлялись срібло-олово-індій піддавались внутрішньому окисленню, порошок розподілявся тонким шаром 1 – 1,5 мм. Лодочка із нержавіючої сталі завантажувалась в трубчасту піч, через яку пропускався кисень. Температура окислення складала 700 – 750 °C. Із окислених порошків пресувались контакти, тиск пресування 2 – 2,5 МПа.

Контакти спікались в повітряній атмосфері при 900 °C протягом 1 години, допресовувались при тиску 6 МПа. Потім повторно спікались при 800 °C протягом 1 години, калібрувались при тиску 9 МПа і відпалювались при 500 °C протягом 1 години.

Мікроструктурний аналіз дослідного матеріалу на основі срібла з оксидними добавками дозволив виявити загальну картину розподілу оксидних добавок в срібній матриці (рис. 1).

Мікроструктура дослідних зразків складається з областей чітко виділених зерен та білих полів. Мікроструктура зразків окислених при 750 °C, являє собою чітко виділені зерна.

Як показали виміри мікротвердості, білі поля мають більш високі значення Нв = 146 – 248 кгс/мм<sup>2</sup>, а для зерен Нв = 110 – 153 кгс/мм<sup>2</sup>. Білі поля – це дуже дрібні частинки оксиду олова, що розташовані всередині зерен срібла і визивають значне дисперсне твердіння срібної матриці.

В ділянках з виділеними границями оксид олова розташовується в основному на границі зерен, тому твердість цих ділянок нижча.

Структура поверхні руйнування енергією електричної дуги тісно пов'язана з фізико-механічними властивостями оксидів і цирконію, розмірів частинок оксидів, їх об'ємної кількості і міцності поверхні розділу.



Рис. 1. Мікроструктура дослідного екологічно безпечного контактного матеріалу (збільшено в 150 разів)

Залежність електричної ерозії контакт-деталей від кількості комутацій при силі струму 100 А приведена на рис. 2, з якого видно, що електроерозійна стійкість дослідних контактів в 1,6 рази вища, ніж у серійних контактів типу КМК-А10м.

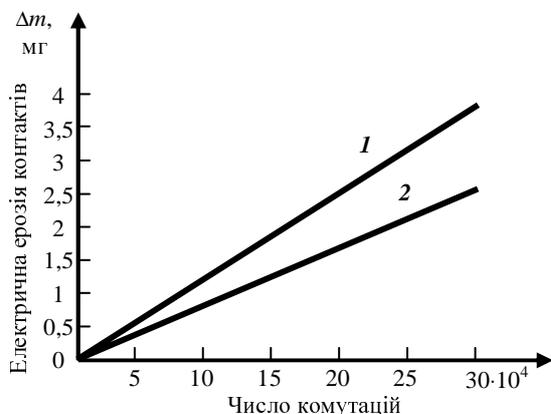


Рис. 2. Електрична ерозія контакт-деталей магнітного пускача ПМЛ 5100 в залежності від циклів комутацій: 1 – контакт КМК-А10м; 2 – дослідні контакти (82% мас. Ag + 11,5% мас. SnO<sub>2</sub> + 4% мас. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2% мас. Zr + 0,5% мас. WO<sub>3</sub>)

Контактний опір у контактів типу КМК-А10м та дослідного матеріалу однаковий і складає  $R_k = 0,7$  Ом. Сила приварювання контакт-деталей при струмі 100А становила 0,02 Н, а у серійних контактах типу КМК-А10м ця сила становила 0,05 Н.

## ВИСНОВКИ

Використання в матеріалі контакт-деталей на основі срібла, малотоксичної добавки оксиду олова замість токсичного оксиду кадмію, що відноситься до першої групи токсичності, значно підвищить рівень екологічної чистоти матеріалу, а сумісне введення у композитний матеріал таких малотоксичних інгредієнтів як оксиди олова та індію, вольфраму та металу цирконію значно підвищує електроерозійну стійкість, надійність контактування та суттєво зменшує силу приварювання контактів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Мастеров В.А., Саксонов Ю.В. Серебро, сплавы и биметаллы на его основе. Справочник. – М.: 1979, 295с.
2. Державні санітарні правила та норми України. № 2.2.7. 029-99. – Додаток 2, п.22.
3. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
4. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде. Доклад Совета управляющих/Глобального форума по окружающей среде на уровне министров о работе его двадцать пятой сессии (Найроби, 16 – 20 февраля 2009 года).
5. Афонин М.П., Овчинникова М.Н. Классификация материалов для электрических контактов низковольтной коммутационной аппаратуры и области их применения в электротехнике. – Электрические контакты и электроды // Труды Института материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. – Киев, 2006, с. 153 – 160.
6. <http://www.inmet.gliwice.pl>.
7. Патент України на корисну модель №18931 від 15.11.2006 р. Спечений матеріал для електричних контакт-деталей.

Надійшла 11.04.2009

Кохановський Василь Олександрович, ст. викладач  
 Національний технічний університет України  
 "Київський політехнічний інститут",  
 Україна, 03056, Київ, вул. Янгеля 1/37,  
 кафедра "Поліграфічні машини", тел. (097) 18 76 771,  
 e-mail: kohv@vpf.ntu-kpi.kiev.ua

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ВИРТУАЛЬНОГО СТЕНДА И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

*Представлені математична модель трифазного асинхронного двигуна і алгоритм її реалізації стосовно віртуального дослідницького стенду цього двигуна. Подані схема і графічна модель стенду, а також робочі характеристики двигуна, отримані у віртуальній лабораторії, в якій він розташований.*

*Представлены математическая модель трехфазного асинхронного двигателя и алгоритм ее реализации применительно к виртуальному исследовательскому стенду этого двигателя. Показаны схема и графическая модель стенда, а также рабочие характеристики двигателя, полученные в виртуальной лаборатории, в которой он расположен.*

### ВВЕДЕНИЕ

Виртуальная реальность (VR) [1-3] – высокоразвитая форма компьютерного моделирования, которая позволяет пользователю погрузиться в искусственный мир и непосредственно действовать в нем с помощью специальных сенсорных устройств, которые связывают его движения с аудиовизуальными эффектами. При этом зрительные, слуховые, осязательные и моторные ощущения пользователя заменяются их имитацией, генерируемой компьютером. Характерными признаками VR являются: моделирование в реальном масштабе времени; имитация окружающей обстановки с высокой степенью реализма; возможность воздействовать на окружающую обстановку и иметь при этом обратную связь.

Одним из эффективных применений VR является создание и использование для различных целей учебного и научно-исследовательского характера виртуальной электромашинной лаборатории (ВЭМЛ), концепция которой представлена в [4]. Виртуальная лаборатория со стороны пользователя представляет собой высокореалистичную пространственную многокомпонентную модель [5] исследуемого объекта и сопутствующих элементов испытательного стенда, поведение которых управляется математической моделью. Состояние математической модели изменяется посредством интеракторных функций, которые определяют связи между действиями пользователя и состоянием графической модели. Первыми объектами для ВЭМЛ избраны однофазный трансформатор, двигатель постоянного тока и трехфазный асинхронный двигатель (ТАД).

Для виртуальной реализации стендов с этими и другими объектами необходимы соответствующим образом адаптированные математические и графические модели, которые активно взаимодействуют в процессе эксплуатации. Математические модели для первых двух объектов представлены в [6, 7].

Целью данной работы является разработка и апробация математической модели ТАД с короткозамкнутым ротором, которая предназначается для виртуального лабораторного стенда. Причем на данном этапе необходима такая модель, которая наиболее реалистично отрабатывает изменение механической нагрузки на валу и при этом позволяет посредством "виртуальных" измерений получить рабочие характеристики ТАД при определенном наборе заданных ис-

ходных параметров. Неотъемлемой особенностью математической модели, которая реализуется в среде ВЭМЛ [3, 8] в реальном времени, должно быть её достаточно высокое быстродействие, так чтобы в процессе виртуальных экспериментов не происходило "горможение" динамической графической модели, отображающей ТАД, пространство, оборудование и другие элементы ВЭМЛ. В итоге нужен строгий и "быстрый" алгоритм расчета рабочих характеристик ТАД на основе заданных и варьируемых параметров.

### ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ К ФОРМИРОВАНИЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТАД

В теории ТАД [9] для анализа их режимов работы и получения рабочих характеристик используются различные схемы замещения. Как одну из основ математической модели в данной работе возьмем Г-образную схему замещения приведенного ТАД (рис. 1), которая используется в процессе проектирования [10] и может быть использована в комплекте с проектным алгоритмом варьирования параметрами ТАД при изменении его нагрузки.

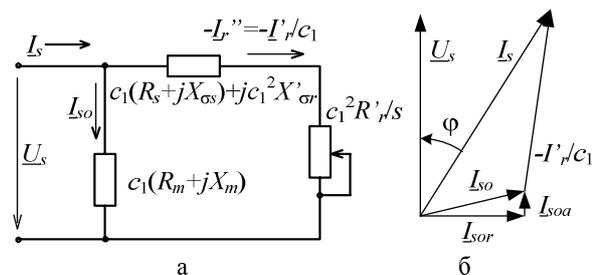


Рис. 1. Преобразованная Г-образная схема замещения приведенного асинхронного двигателя и соответствующая ей векторная диаграмма

Достоинством Г-образной схемы замещения является то, что ее исходные параметры формируются одноразово и в дальнейшем требуется минимально короткий алгоритм повторяющихся вычислений. Так как элементы этой схемы являются линейными, то соответствующая математическая модель имеет известный уровень приближенности. Поэтому представленные далее математическую модель и алгоритм можно считать структурами первого уровня точности. Хотя заметим, что в отличие от [9, 10], здесь все-таки вводятся уточняющие расчетные элементы при определении некоторых параметров ТАД. В дальнейшем

математическая модель и алгоритм могут быть уточнены на основе введения нелинейных функций ряда параметров в зависимости от состояния электромагнитной системы ТАД. Это может быть сделано посредством определения параметров ТАД численно-полевыми расчетами [11].

В качестве исходных данных для апробации математической модели виртуального ТАД используются следующие заданные и рассчитанные в [10] проектные параметры: номинальная мощность  $P_N = 15$  кВт; номинальное фазное напряжение  $U_{sN} = 220$  В и фазный ток статора  $I_{sN} = 29$  А; числа пар полюсов  $p = 2$  и фаз обмотки статора  $m_s = 3$ ; частота  $f_s = 50$  Гц; номинальное скольжение  $s_{nom} = 0,026$ ; сопротивления фазы обмотки статора: активное  $R_s = 0,402$  Ом, реактивное  $X_{\sigma s} = 0,725$  Ом; приведенные сопротивления фазы обмотки ротора: активное  $R'_r = 0,196$  Ом, реактивное  $X'_{\sigma r} = 1,02$  Ом; потери мощности: механические при холостом ходе  $P_{meco} = 117$  Вт, магнитные полные  $P_{mag} = 358,1$  Вт, добавочные в номинальном режиме  $P_{ad nom} = 84,3$  Вт; коэффициент вторичного приведения тока ротора  $c_1 = 1,026$ ; реактивная  $I_{sor} = 7,75$  А и активная  $I_{soa} = 0,83$  А составляющие тока холостого хода.

#### ОБЩИЙ ПРИНЦИП РАСЧЕТА РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТАД

При обычном расчете рабочих характеристик ТАД задается и варьируется в заданных пределах скольжение  $s$ , а расчеты остальных параметров ведутся на основе Г-образной схемы замещения и векторной диаграммы приведенного ТАД (рис. 1) и уже представленных выше его параметров.

Для виртуального стенда с ТАД независимой переменной, которая обусловлена его нагрузкой, должен явиться момент сопротивления на валу  $M$ . Поэтому обычный алгоритм расчета рабочих характеристик для ВЭМЛ не подходит, тем более, что известные связи объединяют скольжение не с моментом  $M$ , а с электромагнитным моментом  $M_{em}$ . Тем не менее, перед тем как представить необходимые для ВЭМЛ математическую модель и алгоритм, представим обычный порядок расчета рабочих характеристик. В данной работе это не окажется лишним, так как элементы обычного расчета затем будут использованы в основном – новом алгоритме.

Итак, исходя из заданного значения скольжения  $s$  и других исходных параметров ТАД, можно определить следующее [9, 10]:

– частоты вращения магнитного поля статора и непосредственно ротора:

$$n_s = \frac{60 f_s}{p}; \quad n = n_s (1 - s); \quad (1)$$

– активное, реактивное и полное сопротивления ветви вторичного тока в схеме замещения (рис. 1):

$$R = c_1 R_s + c_1^2 \frac{R'_r}{s}; \quad X = c_1 X_{\sigma s} + c_1^2 X'_{\sigma r}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad (2)$$

– вторично и первично приведенные токи ротора

при текущем значении фазного напряжения  $U_s$ :

$$I_r'' = U_s / Z; \quad I_r' = c_1 I_r''; \quad (3)$$

– активная и реактивная составляющие тока обмотки статора и он сам:

$$I_{sa} = I_{soa} + I_r'' \frac{R}{Z}; \quad I_{sr} = I_{sor} + I_r'' \frac{X}{Z}; \quad (4)$$

$$I_s = \sqrt{I_{sa}^2 + I_{sr}^2}; \quad (5)$$

– входная активная мощность двигателя:

$$P_{in} = m_s U_s I_{sa}; \quad (6)$$

– потери мощности электрические в обмотках статора и ротора:

$$P_{els} = m_s R_s I_s^2; \quad P_{elr} = m_s R'_r I_r'^2; \quad (7)$$

– добавочные потери мощности:

$$P_{ad} = P_{ad nom} \left( \frac{I_s}{I_{sN}} \right)^2; \quad (8)$$

– суммарные потери мощности:

$$\Sigma P = P_{mag} + P_{mec} + P_{els} + P_{elr} + P_{ad}, \quad (9)$$

где механические потери мощности  $P_{mec} = P_{meco}$ ;

– полезная выходная мощность двигателя на валу:

$$P = P_{in} - \Sigma P; \quad (10)$$

– коэффициент полезного действия (КПД) ТАД:

$$\eta = \frac{P}{P_{in}}; \quad (11)$$

– коэффициент мощности двигателя:

$$\cos \varphi = \frac{I_{sa}}{I_s}; \quad (12)$$

– момент вращения на валу (он же – момент сопротивления нагрузки):

$$M = 9,549 \frac{P}{n}. \quad (13)$$

Задавая ряд значений  $s$  и проводя расчеты по формулам (1)-(13), можно получить, а затем построить рабочие характеристики ТАД, а именно, зависимости  $I_s(P)$ ,  $\eta(P)$ ,  $\cos \varphi(P)$ ,  $s(P)$ ,  $n(P)$ ,  $M(P)$ .

Эти характеристики имеют традиционный вид [9, 10], но при малых нагрузках, приближающихся к режиму холостого хода, получаются отрицательные значения полезной мощности  $P$  и КПД. В обычной практике эта зона обычно не просчитывается, а параметры режима холостого хода просчитываются отдельно. Для виртуального лабораторного стенда это неприемлемо, т.к. от холостого хода до максимально допустимой нагрузки должен работать единый алгоритм. Кроме того, в ВЭМЛ для ТАД, как уже отмечалось, первичным регулированием должно являться изменение момента вращения на валу  $M$ , а не скольжения  $s$ . Соответственно алгоритм расчета остальных величин должен быть реализован по-другому, например, следующим образом.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТАД ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Исходными являются известные выражения электромагнитного момента [9]:

$$M_{em} = \frac{m_s R_r' I_r'^2}{\Omega_s s} = \frac{p m_s U_s^2 \frac{R_r'}{s}}{\omega_s \left[ \left( R_s + c_1 \frac{R_r'}{s} \right)^2 + \left( X_{\sigma s} + c_1 X_{\sigma r}' \right)^2 \right]}, \quad (14)$$

где кроме уже представленных параметров используются угловая частота электрических величин статора:

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (15)$$

и угловая скорость вращающегося магнитного поля:

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}. \quad (16)$$

Для того, чтобы явно выразить скольжение, преобразуем (14) в квадратное уравнение обычного вида:

$$\left[ R_s^2 + \left( X_{\sigma s} + c_1 X_{\sigma r}' \right)^2 \right] s^2 + \left[ 2c_1 R_s R_r' - \frac{p m_s U_s^2 R_r'}{M_{em} \omega_s} \right] s + c_1^2 R_r'^2 = 0. \quad (17)$$

Решение этого уравнения

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (18)$$

выражает скольжение через электромагнитный момент с учетом введенных обозначений

$$a = R_s^2 + \left( X_{\sigma s} + c_1 X_{\sigma r}' \right)^2;$$

$$b = 2c_1 R_s R_r' - \frac{p m_s U_s^2 R_r'}{M_{em} \omega_s}; \quad c = c_1^2 R_r'^2.$$

Очевидно, что в (18) с возрастанием  $M_{em}$  достижение предельного (еще не отрицательного) значения  $b^2 - 4ac = 0$  будет соответствовать максимальному электромагнитному моменту  $M_{emmax}$ . Тогда из (18) получится критическое скольжение:

$$s_{cr} = \frac{-b}{2a} = \frac{-2c_1 R_s R_r' + \frac{p m_s U_s^2 R_r'}{M_{emmax} \omega_s}}{2 \left[ R_s^2 + \left( X_{\sigma s} + c_1 X_{\sigma r}' \right)^2 \right]}. \quad (19)$$

В (18) из вариантов " $\pm$ " знак " $-$ " соответствует устойчивому режиму работы при  $s < s_{cr}$ , " $+$ " – неустойчивому при  $s > s_{cr}$ .

Непосредственно из  $b^2 - 4ac = 0$  получим выражение максимального электромагнитного момента:

$$M_{emmax} = \frac{p m_s U_s^2}{2c_1 \omega_s \left[ R_s + \sqrt{R_s^2 + \left( X_{\sigma s} + c_1 X_{\sigma r}' \right)^2} \right]}, \quad (20)$$

где из вариантов " $\pm$ " перед радикалом оставлен знак "+", соответствующий двигательному режиму.

Формула (20) соответствует известному выражению  $M_{emmax}$  [10], выведенному другим путем, что подтверждает правильность принятого здесь подхода.

Подставив в (19) выражение (20), получим также известную формулу критического скольжения [10]:

$$s_{cr} = \frac{R_r' c_1}{\sqrt{R_s^2 + \left( X_{\sigma s} + c_1 X_{\sigma r}' \right)^2}}. \quad (21)$$

В формулу (18) входит электромагнитный момент  $M_{em}$ , однако в итоге необходимо оперировать с моментом вращения на валу  $M$ . Для этого применим следующие соотношения на основе [9, 10].

Механическая мощность, развиваемая двигателем, связана с другими мощностями и потерями мощности через ряд выражений:

$$P_m = (1-s)P_{em} = P_{em} - P_{elr} = P + P_{mec} + P_{ad}. \quad (22)$$

С учетом этого получаем:

$$\frac{P_m}{\Omega_s} = (1-s) \frac{P_{em}}{\Omega_s} = (1-s) M_{em}. \quad (23)$$

Из (23) с учетом (22) электромагнитный момент:

$$M_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s(1-s)} = \frac{P + P_{mec} + P_{ad}}{\Omega_s(1-s)} = M + M_d, \quad (24)$$

где выделены момент вращения:

$$M = \frac{P}{\Omega_s(1-s)} = \frac{P}{\Omega}, \quad (25)$$

угловая скорость вращения ротора:

$$\Omega = \Omega_s(1-s) \quad (26)$$

и внутренняя потеря момента:

$$M_d = \frac{P_{mec} + P_{ad}}{\Omega_s(1-s)} = \frac{P_{mec} + P_{ad}}{\Omega}. \quad (27)$$

Величина  $M_d$  меняется из-за изменения  $P_{ad}$  (8), а также из-за изменения  $P_{mec}$ , если в режиме нагрузки на основе [10] ввести уточненное выражение:

$$P_{mec} = P_{mec0} \left( \frac{n}{n_s} \right)^2 = P_{mec0} (1-s)^2. \quad (28)$$

Имея набор соотношений, можно представить новый алгоритм реализации математической модели ТАД применительно к виртуальному стенду.

#### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИРТУАЛЬНОГО ТАД

Считаем, что есть уже представленные исходные данные:  $P_N$ ,  $U_{sN}$ ,  $p$ ,  $m_s$ ,  $f_s$ ,  $I_{sN}$ ,  $R_s$ ,  $X_{\sigma s}$ ,  $R_r'$ ,  $X_{\sigma r}'$ ,  $P_{mag}$ ,  $P_{mec}$ ,  $P_{adnom}$ ,  $c_1$ ,  $I_{sor}$ ,  $I_{soa}$ ,  $s_{nom}$ .

Фазное напряжение может быть варьируемым параметром, например, в процессе пуска или регулирования частоты вращения ТАД, поэтому необходимо задавать конкретное значение  $U_s$  и все дальнейшее рассчитывать для этого значения.

Вычисляются неизменные далее значения  $X$  (2),  $M_{emmax}$  (20),  $s_{cr}$  (21),  $n_s$  (1),  $\omega_s$  (15) и  $\Omega_s$  (16).

При  $s = s_{cr}$  вычисляются для однократного использования  $R$  и  $Z$  по (2),  $I_r''$  (3),  $I_{sa}$  и  $I_{sr}$  по (4),  $I_s$  по (5),  $P_{mec}$  (28),  $P_{ad}$  (8),  $M_d$  (27).

Итогом этой серии расчетов является определение допустимого максимального момента вращения – нагрузки на валу:

$$M_{max} = M_{emmax} - M_d.$$

Задается ориентировочное значение скольжения  $s_o = 0,0015$  в режиме холостого хода ( $M = 0$ ), например,  $s_o = 0,0015$ . При  $s = s_o$  вычисляются для однократного использования  $R$ ,  $Z$  (2),  $I_r''$  (3),  $I_{sa}$ ,  $I_{sr}$  (4),  $I_s$  (5),  $P_{mec}$  (28),  $P_{ad}$  (8),  $M_d$  (27),  $s$  (18). С этим значением  $s$  расчет повторяется с  $R$ ,  $Z$  (2), и так до тех пор, пока итерационный расчет не сойдется (допустимое расхождение между двумя последними значениями  $s$ ). Итогом этой серии расчетов является значение скольжения  $s_o$  режима холостого хода.

Задается некоторое значение скольжения, например, номинальное  $s = s_{nom}$ . При этом  $s$  вычисляются однократно  $R$ ,  $Z$  (2),  $I_r''$  (3),  $I_{sa}$  и  $I_{sr}$  (4),  $I_s$  (5),  $P_{mec}$  (28),  $P_{ad}$  (8),  $M_d$  (27),  $M_{em}$  (14),  $M$  из (24). Итогом этой серии расчетов является определение ориентировочного номинального момента вращения – нагрузки на валу:  $M_{nom}$ .

Все предыдущее – подготовка отработки конкретных состояний двигателя при заданном значении  $U_s$  и при последующих изменениях момента вращения на валу, что выполняется следующим образом.

В ВЭМЛ средствами регулирования нагрузки задается значение момента вращения на валу  $M$ .

Если это значение превышает допустимое значение  $M_{max}$ , то двигатель в принципе должен остановиться и находиться в режиме короткого замыкания – с заторможенным ротором. Эта ситуация должна отрабатываться в виде срабатывания защиты и отключения напряжения питания ТАД.

Методом спрямления зависимости  $s(M)$  определяется ориентировочное значение скольжения:

$$s = s_o + (s_{nom} - s_o) \frac{M}{M_{nom}} \quad (29)$$

При этом скольжении вычисляются  $R$ ,  $Z$  (2),  $I_r''$  (3),  $I_{sa}$  и  $I_{sr}$  (4),  $I_s$  (5),  $P_{mec}$  (28),  $P_{ad}$  (8),  $M_d$  (27),  $M_{em}$  (24),  $s$  (18). С этим значением  $s$  расчет повторяется, начиная с  $R$ ,  $Z$  (2), и так до тех пор, пока итерационный расчет не сойдется. Это контролируется по допустимому расхождению между двумя последними значениями  $s$ :

$$\frac{abs(s_1 - s_2)}{0,5(s_1 + s_2)} < ds, \quad (30)$$

где  $ds$  – допустимое относительное рассогласование между значениями скольжения в начале  $s_1$  и конце  $s_2$  итерационного цикла (можно принять  $ds = 0,01$ ).

Итогом этой серии расчетов является значение скольжения  $s$  для заданного момента  $M$ . С этим значением  $s$  завершаются расчеты для получения необходимой выходной информации, а именно, определяются:  $I_r'$  (3),  $P_{el_s}$  и  $P_{el_r}$  (7),  $\Sigma P$  (9),  $n$  (1),  $P$  из (25),

$P_{in}$  из (10),  $\alpha$  (11),  $\cos \varphi = \frac{P_{in}}{m_s U_s I_s}$ , на основе чего получаются рабочие, а также механическая характеристика ТАД.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Практической реализация виртуального стенда с ТАД выполнена на основе принципиальной электрической схемы, которая представлена на рис.2, где обозначения элементов выполнено в соответствии со стандартами.

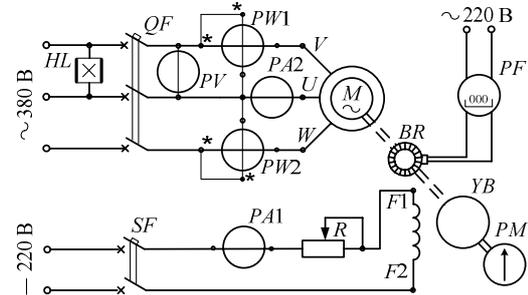


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема стенда

Напряжение питания на ТАД ( $M$ ) подается автоматическим выключателем  $QF$ . Нагрузка ТАД осуществляется электромагнитным тормозом  $YB$ . Ее уровень регулируется током обмотки возбуждения  $F1-F2$ , которая подключается к сети постоянного тока автоматическим выключателем  $SF$  через регулировочный реостат  $R$ , а сила тока контролируется по амперметру  $PA1$ . Момент вращения ТАД  $M$  измеряется стрелочным указателем  $PM$  на электромагнитном тормозе.

Ток, напряжение и входная активная мощность двигателя измеряются вольтметром  $PV$ , амперметром  $PA2$  и системой из двух ваттметров  $PW1$  и  $PW2$ . Частота вращения ротора ТАД определяется с помощью специального устройства – индикатора частоты вращения  $BR$  и отсчетного прибора  $PF$ .

Общий вид ВЭМЛ представлен на рис. 3 одним из фиксированных "снимков" лаборатории на экране компьютера. На рис. 4 более детально показан ТАД с присоединенным электромагнитным тормозом и механическим отсчетным устройством вращающего момента. Таких фиксированных снимков можно сделать множество, как и в реальной лаборатории. Ведь помещение ВЭМЛ, виртуальный стенд, исследуемое устройство ТАД и прочее оборудование внешне представлены полноцветной динамической графической трёхмерной моделью, которая, с помощью специальных программных модулей (интеракторов) может быть полностью управляема [3, 8].

Перемещение по лаборатории, включение и выключение напряжения, и положений переключателей, ползунков регуляторов и прочие действия проводятся оператором посредством конкретно зарезервированных клавиш на клавиатуре в совокупности с курсором на экране и "мыши". Изменяя состояние графической модели на экране монитора, пользователь изменяет состояние системы математических моделей. Под этой системой следует понимать связанные через специальные проху-функции программные модули, которые отвечают за моделирование физических процессов (наблюдаемых и только регистрируемых), поведения объектов виртуального мира, откликов на действия пользователя (в том числе и такие, которые являются запрещенными или опасными при работе с реальными объектами).

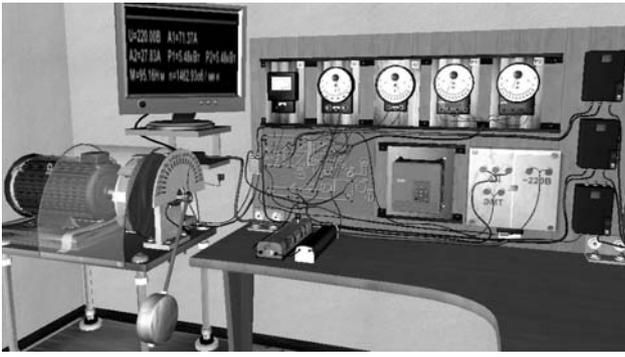


Рис. 3. Общий вид виртуального стенда для исследования асинхронного двигателя

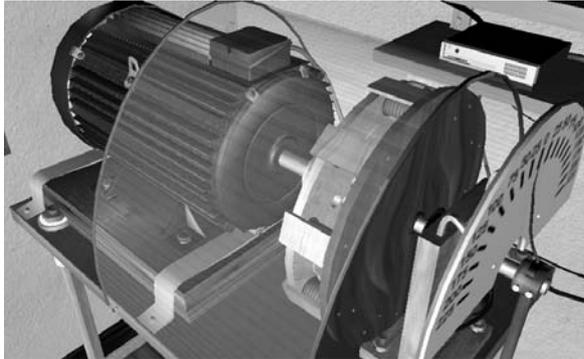


Рис. 4. Виртуальный ТАД с электромагнитным тормозом

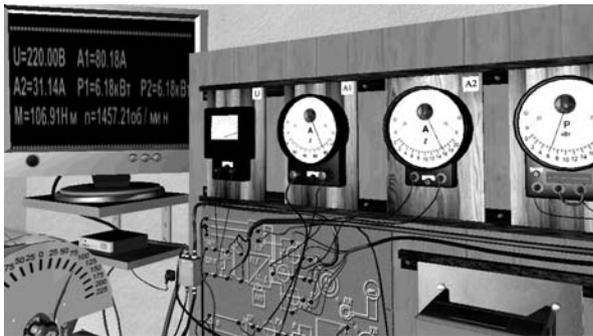


Рис. 5. Измерительные приборы виртуального стенда

Добавим, что измерения величин по приборам, представленным на рис.2, дублируются в цифровой форме и выводятся на монитор, показанный на рис.5.

Все моделируемые процессы в ВЭМЛ сопровождаются воспроизведением характерными для работы ТАД звуками, по тональности которых можно оценить правильность его работы

На рис. 6 графически представлены рабочие характеристики исследуемого ТАД, полученные "экспериментальным" путем в ВЭМЛ. Здесь в безразмерной форме показаны зависимости ряда величин от момента нагрузки  $M$  на валу. Очевидно, что изображенные рабочие характеристики соответствуют аналогичным характеристикам реальных ТАД, что и подтверждает "реальность" их виртуального аналога.

В итоге можно констатировать, что внедрение ВЭМЛ в учебный процесс и исследовательскую деятельность открывает перед ее пользователями новые – еще неизведанные перспективы.

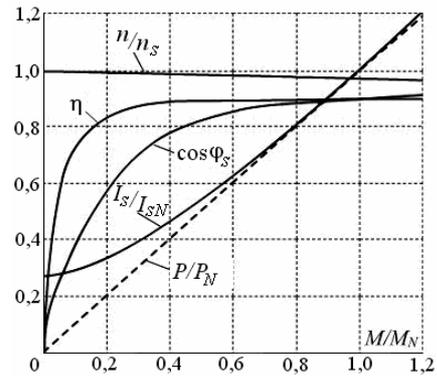


Рис. 6. Рабочие характеристики виртуального ТАД

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Byrne C. Virtual Reality and Education. // University of Washington, Human Interface Technology Laboratory of the Washington Technology Center, Seattle, WA. Technical Publication 2002. -R-93-6.
2. Durlach, N. I. and A.S. Mavor (Eds). Virtual Reality Scientific and Technological Challenges. National Academy Press: Washington, DC. - 1995.- P. 1-40.
3. Милых В.И., Майстренко А.М. Виртуальная реальность и принципы разработки виртуальной лаборатории трансформаторов и электрических машин. // Электротехніка і електромеханіка.-2007.-№2.- С. 74-81.
4. Милых В.И., Майстренко А.М. Концепция электромашиной виртуальной лаборатории и первые этапы ее воплощения // Электромашиностроение и электрооборудование.- Киев: "Техника", 2006.-Вип.66.- С. 217-218.
5. Милых В.И., Майстренко А.М. Результаты разработки базового комплекса виртуальной электромашиной лабораторії // Електроінформ.-Львів.-2007.-№4.- С. 21-23.
6. Милых В.И., Майстренко А.М. Виртуальный стенд для исследования двигателя постоянного тока // Вісник Кременьчущкого державного політехн. ун-ту-Кременчук: КДПУ, 2006.- Вип. 3/2006(38). Частина 1.-С.149-151.
7. Милых В.И., Майстренко А.М. Графо-математическая модель однофазного трансформатора и её программно-виртуальная реализация // Вестник НТУ "ХПИ". Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. - Харьков: НТУ "ХПИ".- 2006.- №35.-С. 79-86.
8. Милых В.И., Майстренко А.М. Особенности разработки математических моделей электрических машин для виртуальных испытательных стендов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 1 // Київ: ІЕД НАНУ.- 2008. - С. 53-56.
9. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин. / Под ред. И.П.Копылова - М.: Энергия, 1980.- 496 с.
10. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
11. 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 27.07.2009

Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.,  
 Майстренко Алексей Михайлович  
 Национальный технический университет  
 "Харьковский политехнический институт"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",  
 кафедра "Электрические машины"  
 Тел. (057) 707-65-14; e-mail: mvkpi@kpi.kharkov.ua;  
 сайт: http://users.kpi.kharkov.ua/kem/

## МАКРОГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РАНГОВАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМАТИКИ МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ

*Систематизовано видову розмаїтість функціонального класу магнітних сепараторів. Визначений кількісний склад і генетична інформація неявних видів, які утворюють інноваційний потенціал досліджуваного класу. Запропоновано рангову структуру основних систематичних одиниць. Показано можливості практичного використання отриманих результатів.*

*Систематизировано видовое разнообразие функционального класса магнитных сепараторов. Определен количественный состав и генетическая информация неявных видов, образующих инновационный потенциал исследуемого класса. Предложена ранговая структура основных систематических единиц. Показаны возможности практического использования полученных результатов.*

### ВВЕДЕНИЕ

Примером наиболее широкого промышленного использования магнетизма после традиционных электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) является магнитная сепарация. Магнитные сепараторы образуют обширный класс разнообразных по конструктивному и функциональному исполнению устройств, предназначенных для разделения смесей материалов по магнитным свойствам [1, 2].

В современных условиях наблюдается тенденция прогрессирующего возрастания структурного и функционального разнообразия магнитных сепараторов, что обусловлено необходимостью в качественно новых устройствах, способных обеспечивать надежное функционирование и требуемые характеристики систем применительно к новым условиям эксплуатации [3, 4]. Все шире применяются магнитные сепараторы для решения разнообразных задач в перспективных отраслях промышленности: для извлечения урана из морской воды, разделения клеток живых организмов на магнитоуправляемые сорбенты (магнитная сепарация клеток спинного мозга и крови), очистки пищевых продуктов (например, для фильтрации горячего шоколада на кондитерских фабриках) и т.д. [5-7]. Все это стимулирует разработку принципиально новых разновидностей магнитных сепараторов с нетрадиционным конструктивным исполнением.

Тенденция неуклонного возрастания разнообразия устройств для магнитной сепарации сопровождается прогрессирующими объемами разрозненной информации, поиск которой связан со значительными временными и материальными затратами. Для упорядочения информации о функциональном классе магнитных сепараторов традиционно используются многочисленные классификации [1, 5, 6], в большинстве из которых учитываются как технологические (функциональные), так и структурные (конструктивные) признаки. Однако такие подходы к классификациям не отличаются строгостью, т.к. практически всегда находятся объекты, которые либо не учтены, либо принадлежат одновременно к разным классификационным группам.

Развитие функционального класса магнитных сепараторов осуществляется в двух направлениях: в направлении разработки конструкций сепараторов

открытого типа, в которых рабочая область с магнитным полем является внешней по отношению к полюсной системе магнитного сепаратора, и в направлении разработки конструкций закрытого типа с рабочей зоной, которая локализуется между полюсами магнитной системы. Наибольшее распространение на практике получили магнитные сепараторы открытого типа, доля которых составляет 70-80% от общего количества магнитных сепараторов. Несмотря на длительный период своего развития (эволюция магнитных сепараторов открытого типа продолжается около 200 лет), системное изучение разнообразия данного класса магнитных сепараторов до сих пор не проводилось.

В этих условиях актуальны исследования, направленные на создание научно обоснованной классификации, позволяющей на единой методологической основе упорядочивать информацию о существующих разновидностях магнитных сепараторов с возможностью предвидения их новых структурных разновидностей. Особую значимость проблема структурного предвидения приобретает в современных условиях жесткой конкуренции между фирмами за рынки сбыта выпускаемой продукции [8].

### ПРОБЛЕМА ГЕНОСИСТЕМАТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КЛАССОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Научное обоснование генетической концепции Вида электромеханической системы (ЭМ-системы), установление связи принципа сохранения генетической информации и закона сохранения базовых Видов электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) [9, 10] позволили объяснить природу многочисленных параллелизмов и гомологий в структурной эволюции объектов электромеханики. Наличие указанных закономерностей открыло возможность постановки важной задачи современной электромеханики – построения генетической систематики расширяющегося разнообразия функциональных классов ЭМ-систем.

Главная задача систематики заключается в обозначении и описании всех индивидуумов класса путем нахождения такой структуры систематических единиц, которая была бы устойчивой по отношению к непрерывно изменяющемуся разнообразию разви-

вающихся видов систем, т.е., максимально приближенной к той, которая, возможно, существует в самой природе. Поэтому проблема геносистематики принадлежит к разряду сложных фундаментальных задач системного характера. С решением проблемы систематики классов ЭМ-систем непосредственно связаны задачи стандартизации и технической терминологии, принципы построения объектно-ориентированных классификаций, информационных баз данных, упорядочение и рациональное построение учебных дисциплин, учебников и справочников.

Генетическая систематика развивающегося структурного разнообразия объектов функциональных классов ЭМ-систем должна удовлетворять следующим требованиям:

- построение систематики должно осуществляться на едином методологическом подходе как по отношению к задачам определения классификационной принадлежности (идентификации генетических кодов), так и к делению расширяющегося разнообразия ЭМПЭ на систематические единицы (таксоны);

- структура систематики должна быть инвариантной ко времени эволюции, т.е. оставаться неизменной как по отношению к существующим, так и по отношению к потенциально возможным классам ЭМПЭ, которые будут возникать в будущем;

- систематика должна обладать функцией предвидения, т.е. ее структура и методология должны обеспечивать возможность определения и упорядочения структурных классов ЭМПЭ, еще отсутствующих на данное время эволюции.

Следует отметить, что в такой постановке проблема систематики решается впервые. Поэтому задачу построения систематики ЭМ-систем следует рассматривать как принципиально новое научное направление исследований не только в фундаментальной электромеханике, но и в науке вообще, синтезирующее теоретические положения таких же новых научных дисциплин, как структурная и генетическая электромеханика, теория видообразования, методология генетического и эволюционного синтеза ЭМ-систем [9-12].

В настоящей статье выносятся на обсуждение основные результаты макрогенетического анализа и ранговая структура систематики магнитных сепараторов как генетически определенного, интенсивно развивающегося функционального класса ЭМ-систем.

#### ГЕНЕТИЧЕСКИЙ КОД И ОСНОВНЫЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

В иерархии усложняющихся генетических уровней структурной организации произвольных Видов ЭМПЭ роль своеобразной передаточной функции выполняет генетическая информация (генетический код) первичного источника поля (ПИП) – пространственной поверхности, на которой задан вид и закон распределения электромагнитного поля. При этом генетический код определяет координаты положения ПИП в предметной области генетической классификации (ГК) [9, 11].

Структура генетического кода состоит из двух частей – буквенной и цифровой. Буквенная часть обозначает укороченное название соответствующего геометрического класса пространственной поверхно-

сти, к которому принадлежит ПИП в структуре ГК: ЦЛ – цилиндрических; КН – конических; ПЛ – плоских; СФ – сферических; ТП – тороидальных плоских; ТЦ – тороидальных цилиндрических. Цифровая часть генетического кода указывает на топологические признаки и вид электромагнитной симметрии ПИП, т.е. указывает на наличие или отсутствие краев (дисимметризирующих факторов) поверхности ПИП: в направлении распространения волны поля (первая цифра кода) и в перпендикулярном направлении (вторая цифра кода). Цифровая часть генетического кода может принимать следующие числовые значения:

0 – абсолютная электромагнитная симметрия (дисимметризирующие факторы или края поверхности отсутствуют);

1 – электромагнитная дисимметрия (частичное нарушение симметрии, обусловленное наличием одного края поверхности);

2 – электромагнитная асимметрия (отсутствие симметрии, обусловленное наличием двух краев поверхности на пути распространения волны электромагнитного поля).

Каждая геометрическая поверхность ПИП может иметь два возможных варианта ориентации поверхностной волны поля: продольную ( $x$ ) и поперечную ( $y$ ), что также отражается в структуре генетического кода.

Фундаментальное значение генетического кода определяется его универсальностью и его функциями. Являясь универсальным способом записи инвариантной части генетической информации, генетический код не только определяет координаты положения ПИП в предметной области ГК, но также отображает информацию об основных систематических единицах класса, к которым относятся Вид, Род, Подсемейство, Семейство, Функциональный класс [9].

Наличие четкой корреляции генетических кодов ПИП с основными таксономическими признаками, открывает возможность построения систематики как реально-информационных Видов, так и потенциально возможных (неявных) Видов, которые еще отсутствуют на данное время эволюции функционального класса ЭМПЭ.

#### КОНЦЕПЦИЯ ВИДА КАК ОСНОВА ГЕНЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМАТИКИ

Функцию системообразующего звена в структуре геносистематики выполняет категория Вида, становлению которой предшествовала разработка генетической теории видообразования [9]. В соответствии с принципом сохранения генетической информации базовые Виды служат системными инвариантами в расширяющемся разнообразии функциональных классов ЭМПЭ.

Вид представляет собой генетически изолированную целостную систему с характерной для него внутривидовой структурой генетически родственных популяций (групп) реальных и неявных электромеханических объектов. Для отображения внутренней, генетически обусловленной, структуры Вида предначерчены генетические модели (например, та, которая показана на рис.1). Генетическая модель является информационной и динамической, т.к. моделирует процесс усложнения уровней структурной организации

произвольного Вида во времени, который может быть представлен в виде: "Первичный источник поля (ПИП)" → "Набор порождающих электромагнитных структур (геном Вида)" → "Популяции" → "Вид". Исходной информацией при построении генетической модели служит периодическая структура генетической классификации (ГК) ПИП [9, 11]. Основными структурными единицами ГК выступают период и группа (по аналогии с Периодической системой химических элементов). Предметную область ГК (рис. 1) можно рассматривать как ортогональную матричную структуру, образованную из четырех электромагнитных классов (групп) и шести геометрических классов (периодов) ПИП.

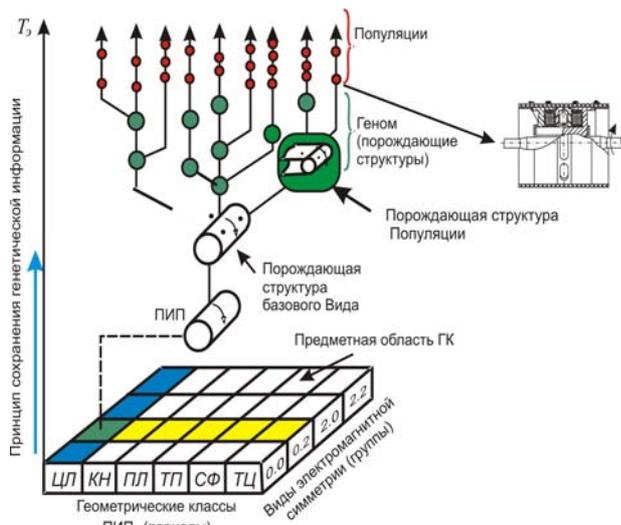


Рис. 1. Генетическая модель внутренней структуры Вида магнитных сепараторов ( $T_s$  – время эволюции)

Для определения принадлежности реального электромеханического объекта к определенному виду необходима идентификация генетической информации ПИП, лежащего в основе структурной организации данного Вида. Рассмотрим процедуру идентификации генетического кода на примере реального электромеханического объекта – электромагнитного сепаратора шкивного типа [13] (рис. 1, 2):

- геометрический класс, к которому принадлежит поверхность ПИП – цилиндрический ( $ЦЛ$ );
- ориентация направления распространения волны электромагнитного поля относительно оси симметрии ПИП – поперечная ( $ЦЛ_T$ );
- общее количество диссимметризирующих факторов (краев) поверхности ПИП – два: ноль – в поперечном направлении; два – в продольном направлении ( $0.2$ );
- топологический класс поверхности ПИП – ориентированная ( $y$  – ориентация) односторонняя поверхность с краями ( $0.2y$ );
- вид электромагнитной симметрии – продольно-симметричная ( $0.2$ ).

Идентификация генетического кода реального электромеханического объекта (рис. 2) и генетический анализ его структуры позволяют определить принадлежность электромагнитного шкива к базовому виду цилиндрических, продольно-симметричных,

$y$  – ориентированных ( $ЦЛ_{T0.2y}$ ). Генетический код также указывает на принадлежность объекта к другим надвидовым систематическим классам или таксонам, например, к Роду и Подсемейству (рис. 2). Так, электромагнитный шкив (рис. 2), как представитель Вида  $ЦЛ_{T0.2y}$ , может быть отнесен к Роду цилиндрических и Подсемейству магнитных сепараторов вращательного движения.

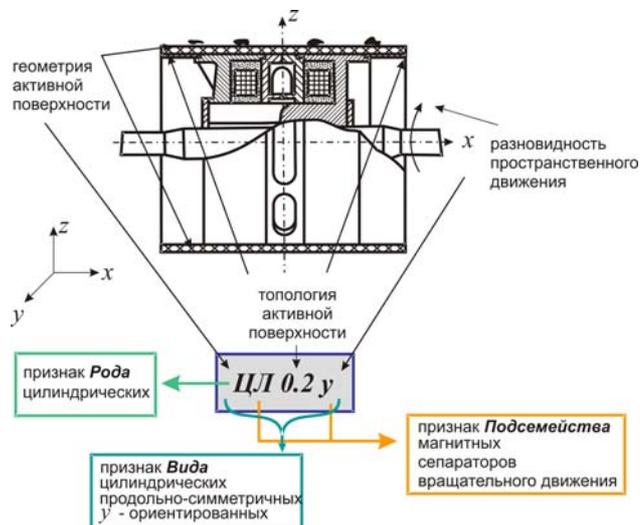


Рис. 2. Связь генетического кода с существенными признаками магнитного сепаратора и таксономическими категориями (на примере представителя вида цилиндрических, продольно-симметричных,  $y$  – ориентированных)

## ОБЛАСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПОРОЖДАЮЩИХ СТРУКТУР ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КЛАССА МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ

Решение задачи построения генетической систематики Видов магнитных сепараторов открытого типа предусматривает определение границ, количества и структуры полного Видового состава исследуемого класса устройств. Общность генетической информации ПИП и соответствующего Вида позволяет определять Видовое разнообразие исследуемого функционального класса через понятие области существования порождающих электромагнитных структур [9].

Первичная структура, с появлением которой начинается эволюция некоторой группы (популяции) генетически родственных электромеханических объектов или Вида в целом, называется порождающей электромагнитной структурой [9]. Совокупность порождающих электромагнитных структур популяций образует геном Вида (рис. 1). После определения порождающей структуры осуществляется формирование ее конструктивных признаков и расширение областей практического использования. Под влиянием потока инноваций оптимизируется ее конструкция, предлагаются новые структурные разновидности и, таким образом, осуществляется формирование популяционной структуры Вида.

Для определения области  $Q$  возможного существования порождающих структур необходимо выделить существенные признаки магнитных сепараторов от-

крытого типа, совокупность которых обобщается понятием целевой функции  $F_{II}$  поиска. В данном случае к таким признакам могут быть отнесены следующие:

- наличие первичной твердотельной структуры (источника магнитного поля) –  $F_{II1}$ ;
- наличие вторичной дискретной структуры (ферромагнитных рабочих тел) –  $F_{II2}$ ;
- открытость рабочей зоны, т.е. достаточно большие длина и высота рабочей зоны –  $F_{II3}$ ;
- возможность размещения в пространстве между первичной и вторичной структурами немагнитного разгрузочного экрана, реализующего вращательное (криволинейная траектория перемещения ферромагнитных тел в рабочей зоне) или поступательное (прямолинейная траектория перемещения ферромагнитных тел) движения –  $F_{II4}$ .

Тогда на область  $Q$  функции  $F_{II} = (F_{II1}; F_{II2}; F_{II3}; F_{II4})$  поиска накладываются следующие ограничения:

$$Q_{МСвр} = \left| \begin{array}{l} 0.0 | ТП0.0у \\ 0.2 | ТП0.2у, ЦЛ0.2у, КН0.2у, СФ0.2у, ТЦ0.2у \\ 2.2 | ТП2.2у, ЦЛ2.2у, КН2.2у, СФ2.2у, ТЦ2.2у \end{array} \right|, \quad (1)$$

$$Q_{МСп} = \left| \begin{array}{l} 0.0 | ТП0.0х \\ 0.2 | ПЛ0.2у \\ 2.0 | ПЛ2.0х, ТП2.0х, ЦЛ2.0х, КН2.0х \\ 2.2 | ПЛ2.2х, ПЛ2.2у, ТП2.2х, ЦЛ2.2х, КН2.2х \end{array} \right|, \quad (2)$$

1. Определение области  $Q$  осуществляется в пределах первого большого периода  $\Pi^I$  ГК ( $\Pi^I \subset < S_0 >$ , где  $< S_0 >$  – упорядоченное множество первичных источников электромагнитного поля в периодической структуре ГК).

2. Функциональная структура рассматриваемого класса ограничивается рассмотрением разнообразия двух подклассов  $Q_{МСвр}$  и  $Q_{МСп}$ , реализующих вращательное и поступательное движения, соответственно.

3. Порождающая структура произвольного Вида представляется электромеханической парой (рис. 1), образованной в результате скрещивания твердотельной первичной и вторичной дискретной структур. Порождающая структура допускает возможность пространственного совмещения с подсистемами другой генетической природы (например, с немагнитными разгрузочными экранами), а также возможность модульного принципа построения.

4. На данном этапе решения задачи из рассмотрения исключаются источники-изотопы, определяющие разнообразие Видов-близнецов, а также сложные варианты совмещенных систем с многоэлементными и гибридными структурами.

Установим соответствие между существенными признаками магнитных сепараторов открытого типа и генетической информацией:

1. Электромеханические объекты с поперечной ориентацией волны электромагнитного поля на цилиндрических (ЦЛ), конических (КН), тороидальных плоских (ТП), тороидальных цилиндрических (ТЦ) и сферических (СФ) поверхностях реализуют возможность совмещения и функционирования с немагнитными разгрузочными экранами вращательного дви-

жения (с криволинейной траекторией перемещения ферромагнитных тел в рабочей зоне).

2. Электромеханические объекты с продольной ориентацией волны электромагнитного поля на цилиндрических (ЦЛ), конических (КН), тороидальных плоских (ТП) поверхностях, а также электромеханические объекты с продольной и поперечной ориентацией волны электромагнитного поля на плоских поверхностях (ПЛ) реализуют возможность совмещения и функционирования с немагнитными разгрузочными экранами поступательного движения (с прямолинейной траекторией перемещения ферромагнитных тел в рабочей зоне).

С учетом отмеченного выше, области  $Q_{МСвр}$  и  $Q_{МСп}$  существования порождающих структур магнитных сепараторов соответственно вращательного и поступательного движений могут быть записаны в следующем виде

где ТП 0.0у, ..., ТЦ2.2у, ТП0.0х, ..., КН2.2х – генетические коды соответствующих ПИП базового уровня. Электромагнитно ассиметричные источники поля (цифровая часть кода 2.2) на сферических (СФ) и плоских (ПЛ) поверхностях с поперечной (у) и продольной (х) ориентацией поля являются геометрически и электромагнитно эквивалентными [9].

Область существования порождающих структур магнитных сепараторов включает только один электромагнитно симметричный источник поля (цифровая часть кода 0.0), относящийся к геометрическому классу – тороидальные плоские (ТП), который в полной степени удовлетворяет условию открытости рабочей зоны (целевая функция  $F_{II3}$ ). У электромагнитно симметричных источников поля геометрических классов: цилиндрические (ЦЛ), конические (КН), тороидальные цилиндрические (ТЦ), сферические (СФ) и плоские (ПЛ), внутренняя поверхность активной зоны является замкнутой, что противоречит целевой функции поиска  $F_{II3}$ . Электромеханические объекты с продольной ориентацией волны электромагнитного поля на тороидальных цилиндрических (ТЦ) и сферических (СФ) поверхностях исключены из рассмотрения в силу достаточно сложного характера их поверхности, затрудняющего совмещение с немагнитными разгрузочными экранами (целевая функция  $F_{II4}$ ).

Области  $Q_{МСвр}$  и  $Q_{МСп}$  существования порождающих структур базового уровня магнитных сепараторов соответственно вращательного и поступательного движений могут быть представлены в координатах ГК (выделены серым цветом в табл.1).

Таким образом, область  $Q_{МСвр}$  существования порождающих структур магнитных сепараторов вращательного движения, как следует из выражения (1),

включает 12-ть источников базового уровня, упорядоченных в пределах трех групп электромагнитной симметрии и пяти геометрических классов. Согласно выражению (2), область  $Q_{MCn}$  существования порождающих структур магнитных сепараторов поступательного движения включает 11-ть источников базового уровня, которые упорядочены в пределах четырех групп сим-

$$\{HS_{MC_{вр}}\} = \begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.2 \\ 2.2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} TP\ 0.0\ y \\ ЦЛ\ 0.2\ y, KH\ 0.2\ y, TP\ 0.2\ y, C\Phi\ 0.2\ y, TC\ 0.2\ y \\ ЦЛ\ 2.2\ y, KH\ 2.2\ y, TP\ 2.2\ y, C\Phi\ 2.2\ y, TC\ 2.2\ y \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\{HS_{MC_{п}}\} = \begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.2 \\ 2.0 \\ 2.2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} TP\ 0.0\ x \\ ПЛ\ 0.2\ x \\ ЦЛ\ 0.2\ x, ПЛ\ 2.0\ x, TP\ 2.0\ x, KH\ 2.0\ x \\ ЦЛ\ 2.2\ x, ПЛ\ 2.2\ x, KH\ 2.2\ x, TP\ 2.2\ x \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Области существования порождающих структур магнитных сепараторов

Группа ГК	Период ГК					
	ЦЛ	КН	ПЛ	ТП	СФ	ТЦ
0.0	ЦЛ0.0x	КН0.0x	ПЛ0.0x	ТП0.0x	СФ0.0x	ТЦ0.0x
	ЦЛ0.0y	КН0.0y	ПЛ0.0y	ТП0.0y	СФ0.0y	ТЦ0.0y
0.2	ЦЛ0.2y	КН0.2y	ПЛ0.2y	ТП0.2y	СФ0.2y	ТЦ0.2y
2.0	ЦЛ2.0x	КН2.0x	ПЛ2.0x	ТП2.0x	СФ2.0x	ТЦ2.0x
2.2	ЦЛ2.2x	КН2.2x	ПЛ2.2x	ТП2.2x	СФ2.2x	ТЦ2.2x
	ЦЛ2.2y	КН2.2y	ПЛ2.2y	ТП2.2y	СФ2.2y	ТЦ2.2y

Таблица 1

где  $\{HS_{MC_{вр}}\}$  и  $\{HS_{MC_{п}}\}$  – видовой состав базового уровня (в генетических кодах) магнитных сепараторов вращательного и поступательного движений, соответственно.

Таким образом, видовой состав магнитных сепараторов вращательного и поступательного движений представлен 23-мя (12+11) Видами базового уровня.

### МАКРОГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Уровень и темпы эволюции видового разнообразия магнитных сепараторов, а также информацию о структуре неизвестных на данный момент эволюции класса Видах (так называемых неявных Видах) можно изобразить в виде филогенетического дерева, представляющего графическую интерпретацию генетической модели макроэволюции класса (рис. 3).

Первый уровень филогенетической модели отображает геном видового разнообразия исследуемого класса, инвариантный ко времени эволюции. Геном содержит информацию о порождающих структурах как известных, так и потенциально возможных Видов.

Второй уровень наглядно отражает реальный исторический процесс возникновения и расширения количества  $N_{PI}$  реально-информационных Видов. Анализ структурного разнообразия магнитных сепараторов открытого типа, выявленных по результатам патентных исследований, показывает, что все известные технические решения на данном этапе эволюции представлены структурными представителями только десяти реально-информационных базовых Видов (43,5% потенциала базовых Видов класса)

метрии и четырех геометрических классов.

Наличие соответствия между генетическим кодом и системной категорией Вид позволяет установить Видовой состав базового уровня функционального класса магнитных сепараторов вращательного и поступательного движений:

$$N_{PI} = ((S_{TP})_{0.0}; (S_{KH}, S_{TP})_{2.0}; (S_{ЦЛ}, S_{ПЛ}, S_{TP})_{0.2}; (S_{ЦЛ}, S_{KH}, S_{ПЛ})_{2.2}).$$

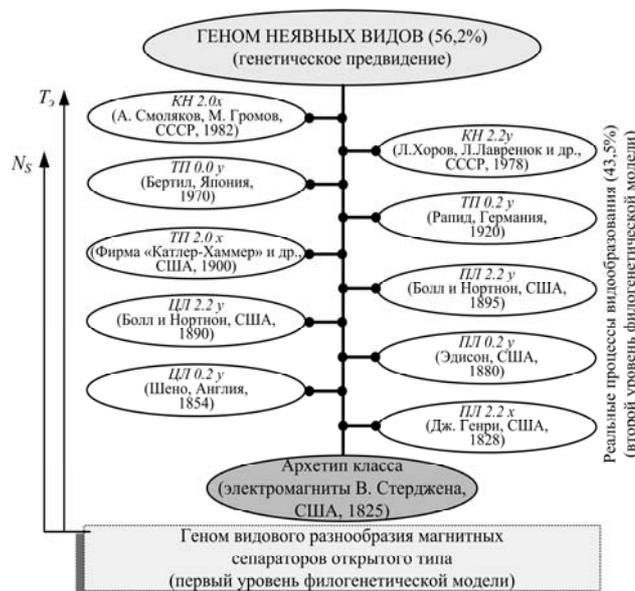


Рис. 3. Филогенетическая модель макроэволюции магнитных сепараторов открытого типа ( $T_e$  – время эволюции (180 лет);  $N_s$  – количество Видов)

Следует отметить, что количество  $N_{PI}$  порождающих структур реально-информационных Видов определялось по результатам патентно-информационного поиска (за период времени с 1930 г. по 2000 г.), кото-

рый в силу объективных причин не гарантирует полноты информации. Поэтому второй уровень филогенетического дерева в дальнейшем может уточняться. Однако, по нашему мнению, соотношение реально-информационных и неявных Видов при этом не изменится существенно.

В результате патентно-информационного поиска были выявлены и генетически идентифицированы структурные представители реально-информационных Видов (например, в [14-19]), некоторые из которых приведены на рис. 4. Вершина дерева (рис. 3) отображает информацию о тех структурных представителях класса, которые отсутствуют на данном этапе эволюции (не обнаружены в результате информационно-патентного поиска).

Таким образом, инновационный потенциал класса представлен 13-тью неявными Видами базового уровня, что составляет 56,5% от общего количества базовых Видов исследуемого класса.

#### РАНГОВАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМАТИКИ.

Наличие системной информации о количестве и генетической структуре Видов позволяет определить ранговую структуру основных систематических единиц класса, в которой Вид выполняет функцию основной систематической категории для таксонов надвидовых уровней: "Вид" → "Род" → "Подсемейство" → "Семейство" (рис. 5). Ранговая последовательность основных систематических единиц является универсальной для произвольных функциональных классов электромеханических систем [10], что обеспечивает методическое единство и инвариантность структуры систематики.

Структурное разнообразие Рода определяется совокупностью генетически родственных Видов, объединенных общностью пространственной геометрии

ПИП. Исторически сформировавшиеся классы сепараторов вращательного и поступательного движения имеют статус Подсемейства, т.к. объединяют соответствующие Родовые таксоны сепараторов по характеру пространственного движения.

Анализ ранговой структуры систематики магнитных сепараторов свидетельствует, что структурное разнообразие магнитных сепараторов вращательного и поступательного движений представлено пятью и четырьмя Родами, соответственно. Подсемейство сепараторов вращательного движения представлено 12-тью базовыми Видами с осесимметричными источниками магнитного поля. Видовое разнообразие подсемейства сепараторов поступательного движения упорядочивается 11-тью Видами с источниками бегущего магнитного поля.

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследований послужили основой для разработки принципиально новой концепции информационного обеспечения проектных процедур на этапе поискового проектирования. Данная концепция предполагает структурированную подачу информации в форме каталогов и электронных баз данных как о существующих (информационно-реальных), так и о потенциально возможных (неявных) Видах магнитных сепараторов. Возможность определения Видового разнообразия класса магнитных сепараторов выступает при этом гарантом полноты подачи информации.

Наличие систематизированной информации о структуре неявных Видов позволяет выполнить направленный синтез патентоспособных технических решений и реализовать инновационный потенциал класса магнитных сепараторов.

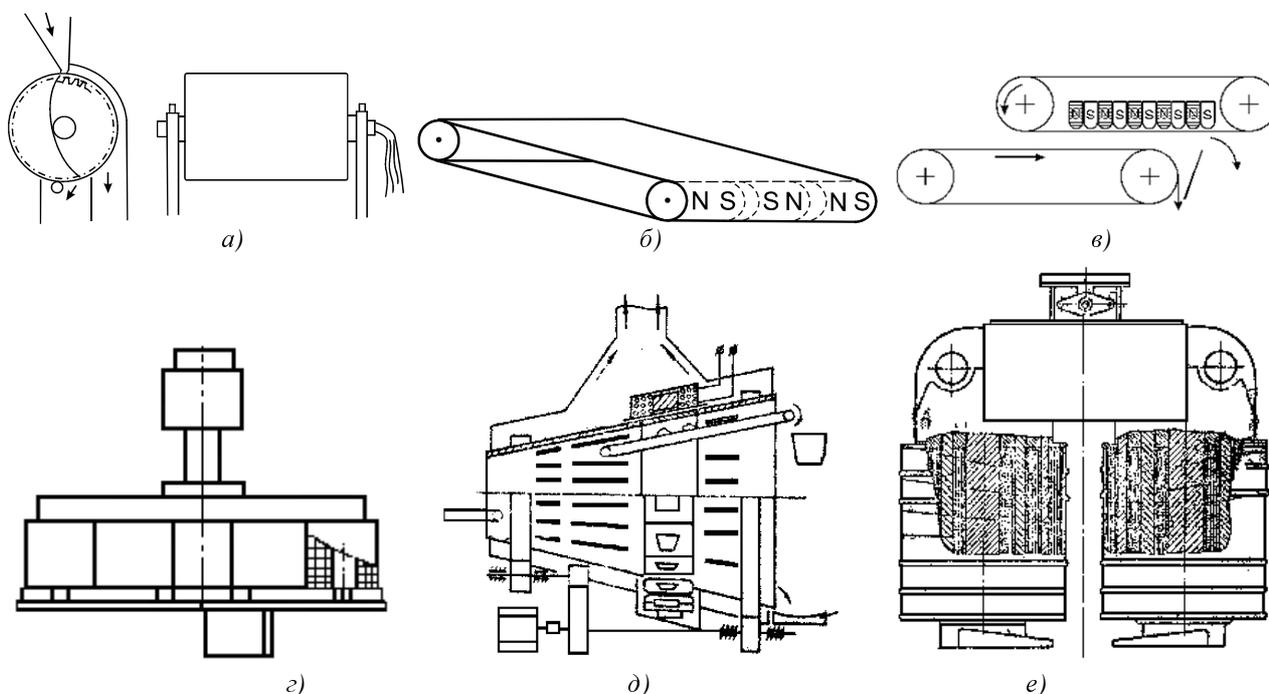


Рис. 4. Структурные представители реально-информационных Видов магнитных сепараторов с открытой рабочей зоной: а) ЦЛ 2.2у [14]; б) ЦЛ 0.2у [15]; в) ПЛ 2.2у [16]; г) ТП 0.2у [17]; д) КН 2.2у [18]; е) ПЛ 2.2 х [19]



Рис. 5. Ранговая структура систематики функционального класса магнитных сепараторов

## ВЫВОДЫ

1. Определены области существования порождающих электромагнитных структур функционального класса магнитных сепараторов вращательного (12-ть источников базового уровня) и поступательного (11-ть источников) движений, которые определяют видовое разнообразие класса.

2. Определена ранговая структура основных систематических единиц исследуемого класса сепараторов. Структурное разнообразие магнитных сепараторов вращательного и поступательного движений представлено двумя подсемействами девяти Родов и 23-мя базовыми Видами. Достоверность структуры систематики обоснована путем ее сопоставления с результатами исторических и патентно-информационных исследований.

3. На основе использования функции предвидения определен количественный состав и геном неявных базовых Видов, разнообразие которых составляет 56,5% от общего количества базовых Видов класса.

4. Результаты исследований составляют основу для организации дальнейших систематических исследований и открывают возможность построения системной концепции информационно-инновационного обеспечения поискового проектирования рациональных конструкций магнитных сепараторов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные и электрические методы обогащения. – М.: Недра, 1988. – 304с.
- Obertuffer I.A. Magnetic separation: a review of principles, devices and applications//IEEE Transactions On Magnetics. – 1974. – Vol.MAG-10. – NO. 2. – PP. 223-238.
- SME Mineral Processing Handbook.- New York: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., 1985. – PP. 6-2-7-34
- Загирняк М.В., Шведчикова И.А. Проблема систематизации магнитных сепараторов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". Ч.8. – 2006. – С. 91-94.
- Svoboda J. Magnetic Methods for the Treatment of minerals. Elsevier, 1987. – 692 p.
- Types of magnetic separators/ Bronkala W.J., Haskin R.J., Tenpas E.J., Lawver J.E./Mineral Processing Handbook. – New York: Society of Mining Engineers, 1985. – PP.29-39.
- Unkelbach K.H. Magnetic separators mode of operation and applicability for the separation of materials. – Köln: KHD Humboldt Wedag AG, 1990. – 87 p.
- Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Технологическое предвидение. – К.: ИВЦ "Видавництво "Політехніка"", 2005. – 156 с.

- Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
- Шинкаренко В. Ф. Принципы построения эволюционной систематики структур электромеханических систем // Техническая электродинамика. – 2000. – № 2. – С. 45-49.
- Шинкаренко В.Ф., Августинович А.А. Генетична класифікація первинних джерел електромагнітного поля. – Київ: НТУУ "КПІ", 2006. – 4 с.
- Августинович А.А. Методологічні основи систематики базових видів електричних машин поступального руху // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ. – 2007. – № 11 (117). – Ч.1. – С. 10-16.
- Электромагнитный шкивной сепаратор; А.С. 187675 В 03 С 01/10; Дьяков Г.И., Тодоров В.С., Скачков А.М. и др. – № 1019470/22-3; Заявл. 15.07.1965; Оpubл. 20.10.1966. – БИ № 21.
- Магнитный сепаратор переменного тока; А.С. 57774 В 03 С 01/24; Одинцов Г.В. – № 21846; Заявл. 16.02.1939; Оpubл. 31.08.1940.
- Нагасима Т. Современные магнитные сепараторные установки // Кагаку когаку. – 1981. – Т.45. – №4. – С. 226-234.
- Деркач В.Г., Дацюк И.С. Электромагнитные процессы обогащения. – М.: Металлургиздат, 1947. – 267 с.
- Железоотделитель; А.С.1639756 А1 В 03 С 1/18; Карташян В.О., Нестеренко А.П., Шведчикова И.А., Капустянов В.Н. – №4647121/03; Заявл. 22.12.1988; Оpubл. 07.04.1991. – БИ № 13.
- Сепаратор для очистки волокнистых материалов; А.С.634789 В 03 С 1/10; Хоров Л.Т., Лавренюк Л.М., Воробьев Ю.Д. – №2459999/22-03; Заявл. 04.03.1977; Оpubл. 30.11.1978. – БИ № 44.
- Электромагнитный сепаратор; А.С. 306873 В 03 С 1/06; Смолкин Р.Д., Шапиро Е.Я., Подольский Ю.К. – № 1256704/22-3; Заявл. 15.07.1968; Оpubл. 21.06.1971. – БИ № 20.

Поступила 06.07.2009

Шинкаренко Василий Федорович, д.т.н., проф.  
Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт"  
Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37

Загирняк Михаил Васильевич, д.т.н., проф.  
Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского  
Украина, 39614, Полтавская обл., Кременчуг,  
ул. Первомайская, 20

Шведчикова Ирина Алексеевна, к.т.н., доц.  
Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля  
Украина, 91034, Луганск, кв. Молодежный, 20А

## РАСЧЁТ ТРЁХМЕРНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Наводится методика скінченноелементного аналізу тривимірних стаціонарних магнітних полів у турбогенераторах й іншому електротехнічному обладнанні. Аналізуються результати розв'язання тестових задач, розглядається достовірність чисельних результатів для окремих випадків. Наводяться результати розрахунків просторового розподілу стаціонарного магнітного поля на різних скінченноелементних сітках для спрощених схем ротора синхронного турбогенератора.*

*Описывается методика конечноэлементного анализа трёхмерных стационарных магнитных полей в турбогенераторах и другом электротехническом оборудовании. Анализируются результаты решения тестовых задач, рассматривается достоверность численных результатов для частных случаев. Приводятся результаты расчетов пространственного распределения стационарного магнитного поля на различных конечноэлементных сетках для упрощенных схем ротора синхронного турбогенератора.*

### ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины различных конструкций и назначения, трансформаторы, электрические аппараты, индукционные нагреватели и электротехнические устройства других видов представляют собой сложные пространственные конструкции с существенно трёхмерным распределением электромагнитного поля. В настоящее время в практике проектирования электротехнического оборудования широко применяется прикладное программное обеспечение для компьютерного моделирования двухмерного электромагнитного поля [1-3]. Разработка эффективных методик и программных средств для расчёта электромагнитных полей в трёхмерной постановке является актуальной научной и прикладной задачей. В последние годы для моделирования трёхмерных электромагнитных полей используется метод конечных элементов [4-7], являющийся одним из наиболее развитых и эффективных методов численного решения уравнений математической физики.

Анализ трёхмерного стационарного магнитного поля представляет значительный научный и практический интерес [4], поскольку результаты расчётов позволяют установить особенности пространственного распределения поля в создаваемом устройстве и его наиболее ответственных конструктивных элементах.

В данной работе описывается разработанная методика компьютерного моделирования методом конечных элементов стационарного трёхмерного магнитного поля в электрических машинах и электротехнических устройствах различного назначения. Для подтверждения достоверности разработанной методики анализируются результаты решения тестовых задач. Решены задачи компьютерного моделирования пространственного магнитного поля для упрощенных схем ротора турбогенератора 300 МВт, которое не может быть рассчитано в двухмерной постановке. Выполнен сравнительный анализ численных результатов, полученных на различных конечноэлементных сетках.

### ОСНОВНЫЕ РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И РЕШЕНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Математическое описание электромагнитных процессов в общем случае представляет собой [4-6] систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме без учёта токов смещения, дополненную материальными уравнениями, определяющими электрофизические свойства материалов (магнитную проницаемость  $\mu$  и удельную электрическую проводимость  $\gamma$ ). В общем случае, магнитная проницаемость  $\mu$  может зависеть от напряжённости магнитного поля  $H$

[7, 8]. Явления магнитного гистерезиса и анизотропии магнитных свойств материалов не учитываются.

В разработанном программном обеспечении реализовано решение линейной задачи расчёта стационарного магнитного поля, т.е. зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  от напряжённости магнитного поля  $H$  не учитывается. При выполнении расчётов для магнитомягких материалов (например, для стали ротора турбогенератора) задаётся постоянное среднее значение магнитной проницаемости.

В данной работе система уравнений Максвелла решается с использованием векторного магнитного потенциала  $A$  [6]. Линейные уравнения стационарного магнитного поля приобретают вид [5, 9]

$$\Delta A + \mu J_S = 0, \quad (1)$$

где  $J_S$  – заданные в одной или нескольких подобластях расчётной области токи в виде вектора плотности тока стороннего источника (например, токи в статоре турбогенератора).

Уравнения (1) с соответствующими граничными условиями решаются методом конечных элементов [4] с использованием 8-узловых конечных элементов в виде произвольных шестигранников. Программное обеспечение разработано для исследования конструкций сложной геометрии в декартовой, цилиндрической, тороидальной и сферической системах координат.

Решение векторной краевой задачи (1) представляется в виде изолиний компонент вектора магнитного потенциала  $A$ , индукции магнитного поля  $B$  и напряжённости магнитного поля  $H$  по всей расчётной области.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ

Для подтверждения достоверности разработанной методики выполнено решение ряда одномерных и двухмерных задач расчёта распределения стационарного магнитного поля. Полученные результаты сравнивались с аналитическими решениями, результатами других авторов, а также с результатами расчётов с использованием разработанной ранее [10] методики и программы для конечноэлементного анализа двухмерных электромагнитных полей. Подробный анализ решённых одномерных тестовых примеров приведен в [11]. Рассмотрим результаты решения двухмерных тестовых задач расчёта стационарных магнитных полей.

1) Решена задача расчёта распределения стационарного двухмерного магнитного поля в конструкции, приведенной на рис. 1.

Расчётная область включает в себя упрощённую модель стального ротора турбогенератора 300 МВт без обмоток возбуждения и пазовых клиньев (подоб-

ласть 1 на рис. 1), упрощённую модель статора (подобласть 2) с заданным постоянным током и воздушные зазоры (подобласти 3). Диаметр ротора 1.10 м, воздушный зазор между статором и ротором – 0.08 м, радиус удалённой границы  $\Gamma$  (см. рис. 1), на которой задаётся нулевое значение векторного магнитного потенциала, составляет 1.50 м [10]. В подобласти 2 (материал – медь) толщиной 0.05 м задана компонента  $J_z$  плотности постоянного тока стороннего источника  $10^6 \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$ , компоненты  $J_x$  и  $J_y$  приняты равными нулю. Материал ротора – сталь с постоянным средним значением магнитной проницаемости  $\mu=100\mu_0$  ( $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума) [10].

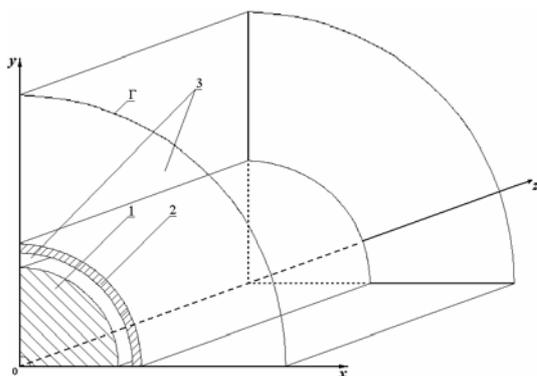


Рис. 1. Трёхмерная упрощённая схема ротора турбогенератора

Характер распределения стационарного магнитного поля позволяет рассмотреть  $1/4$  часть упрощённой схемы турбогенератора (см. рис. 1). Уравнение (1) решается при граничных условиях, соответствующих расчётной схеме [10]:

- на оси симметрии ( $x = 0$ ):  $\frac{\partial A_z}{\partial x} = 0$ ;
- на оси антисимметрии ( $y = 0$ ):  $A_z = 0$ ;
- на удалённых границах  $\Gamma$  в диэлектрических под областях  $A_z = 0$ .

При использовании трёхмерной постановки задачи для получения двухмерного распределения магнитного поля на обоих торцах ротора задаются граничные условия симметрии

$$\frac{\partial A_z}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

что обеспечивает равномерное распределение поля по длине ротора.

На рис. 2 приведены линии равного уровня векторного магнитного потенциала (единственная компонента  $A_z$ ) в поперечном сечении рассматриваемой расчётной области. Выполнено сравнение результатов, полученных при решении задачи с использованием трёхмерной и двухмерной [10] моделей. Погрешность не превышает 0.13 %.

2) Выполнен расчёт распределения стационарного магнитного поля в роторе турбогенератора 300 МВт в поперечном сечении, приведенном на рис. 3, по данным чертежа ротора [10].

Основная информация по геометрии конструкции, материалам ротора, граничным условиям и стороннему источнику тока приведена выше. Обмоточные пазы (см. рис. 3) (кроме пазов на поверхности большого зуба) заполнены медной обмоткой. Материал немагнитных пазовых клиньев (кроме пазов на поверхности большого зуба) – дюралюминий. Пазовые клинья на поверхности большого зуба выполнены из той же стали, что и ротор.

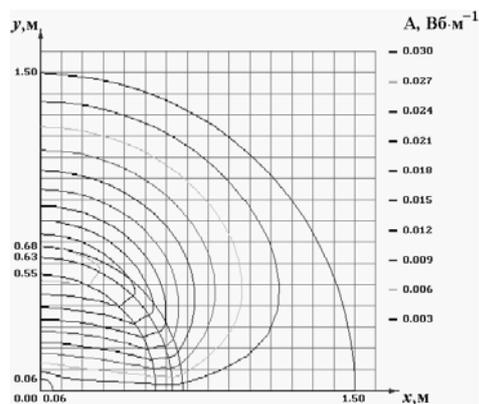


Рис. 2. Распределение векторного магнитного потенциала (упрощённая схема турбогенератора,  $1/4$  поперечного сечения)

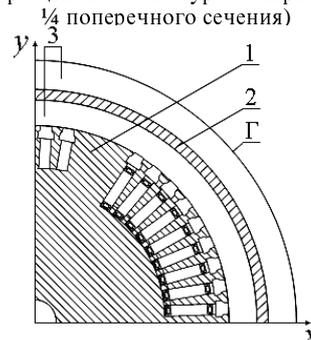


Рис. 3. Поперечное сечение расчётной области турбогенератора 300 МВт:

- 1 – ротор, 2 – подобласть с заданной плотностью тока статора, 3 – воздух;  $\Gamma$  – удалённая граница

Решение задачи выполнено с использованием описанного в данной статье программного обеспечения для расчёта стационарных трёхмерных магнитных полей, а также с помощью разработанной ранее программы для конечноэлементного анализа электромагнитных процессов в двухмерной постановке [10]. Для выполнения сравнения численных результатов предполагалось, что пространственное распределение магнитного поля по длине ротора является равномерным. Для реализации данного предположения при решении трёхмерной задачи на обоих торцах ротора задавались граничные условия симметрии (2).

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что погрешность расчёта магнитного поля в поперечном сечении ротора турбогенератора (см. рис. 3) не превышает 4.1%.

Таким образом, разработанная методика позволяет выполнять конечноэлементный анализ трёхмерных стационарных магнитных полей с точностью, достаточной для использования полученных результатов в инженерной практике.

#### ТРЕХМЕРНОЕ СТАЦИОНАРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ФРАГМЕНТАХ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Выполнено решение следующих задач расчёта пространственного распределения стационарного магнитного поля во фрагментах ротора турбогенератора 300 МВт с поперечным сечением, представленным на рис. 3.

1) Расчётная область (рис. 4) представляет собой упрощённую схему ротора турбогенератора длиной 5 м, на одном краю которого заданы граничные условия  $A_x = 0$ ,  $A_y = 0$  и  $A_z = 0$ , а на другом – граничные условия симметрии вида (2) для всех трёх компонент векторного магнитного потенциала.

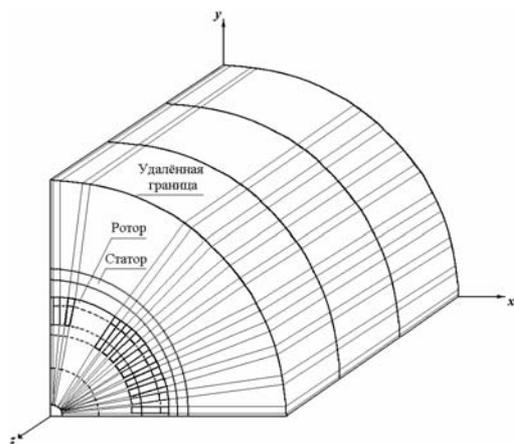


Рис. 4. Трёхмерная схема ротора турбогенератора

В подобласти 2 (см. рис. 3) заданы следующие величины компонент плотности постоянного тока стороннего источника:

$$J_x = 10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}; J_y = 2 \cdot 10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}; J_z = 4 \cdot 10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}.$$

На рис. 5 показано полученное распределение компонент векторного магнитного потенциала  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  соответственно по длине ротора. Результаты приведены для следующих точек, расположенных под углом  $45^\circ$  к осям  $x$  и  $y$ :  $C$  – на наружной поверхности ротора;  $C_1$  – непосредственно под пазовым клином;  $C_2$  – непосредственно под обмоточным пазом.

Как правило, существенный интерес представляет численный анализ электромагнитного поля в концевой зоне ротора, где оно носит трёхмерный характер. Полученные результаты показывают, что такие исследования могут быть выполнены с использованием разработанной методики и программного обеспечения.

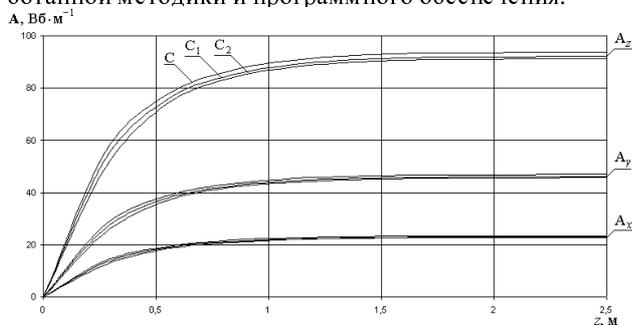


Рис. 5. Распределение компонент векторного магнитного потенциала по длине ротора турбогенератора

Решение данной задачи выполнялось на различных конечноэлементных сетках. Рассматривались варианты разбивки расчётной области на конечные элементы с общим числом узлов 18603, 32383 и 47541. Число узлов в направлении оси ротора составляло 13, а в поперечном сечении ротора (в плоскости  $xOy$ ) – 1431, 2491 и 3657 соответственно. При этом число узлов в направлении оси  $y$  (см. рис. 3, 4) составляло 53. Варьировалась разбивка на конечные элементы в окружном направлении. Сравнились результаты, полученные на различных конечноэлементных сетках в следующих точках, расположенных на расстоянии 2.5 м от левого края ротора под углом  $45^\circ$  к осям  $x$  и  $y$ :  $B$  – на наружной поверхности ротора;  $B_1$  – непосредственно под пазовым клином;  $B_2$  – непосредственно под обмоточным пазом. Полученные результаты приведены в табл. 1, в которой приняты следующие обозначения:  $ku_2$  – число узлов в окружном направлении,  $kue$  – общее число узлов конечноэле-

ментной сетки.

Как следует из анализа результатов, приведенных в табл. 1, величина векторного магнитного потенциала существенно не изменяется при увеличении числа узлов в окружном направлении с 27 до 47, т.е. общего числа узлов более 18603 (расхождение 0.06 % по сравнению с числом узлов 32383).

Таблица 1  
Численные результаты, полученные на различных конечноэлементных сетках  
(параметры компьютера: 1.73 ГГц, 1.75 Гб)

ku2/kue	A,(2.5 м), Вб·м <sup>-1</sup>			Время счёта, мин
	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B	
69/47541	22.8286	23.0399	23.4585	280
47/32383	22.8196	23.0302	23.4449	130
27/18603	22.8080	23.0164	23.4358	17

Таким образом, решение задачи расчёта стационарного магнитного поля в данном конкретном случае целесообразно выполнять на конечноэлементной сетке, содержащей порядка 1400 – 1500 узлов в поперечном сечении ротора. Увеличение числа узлов приводит к увеличению времени счёта без существенного повышения точности численных результатов.

2) Выполнен расчёт пространственного стационарного магнитного поля в местах стыка пазовых клиньев по длине ротора турбогенератора. Поперечное сечение ротора приведено на рис. 3, общий вид рассматриваемой конструкции ротора – на рис. 6, рассматриваемый участок ротора (стыки пазовых клиньев) – на рис. 7. Длина фрагмента – 40 см, толщина воздушного зазора между клиньями – 1.5 мм.

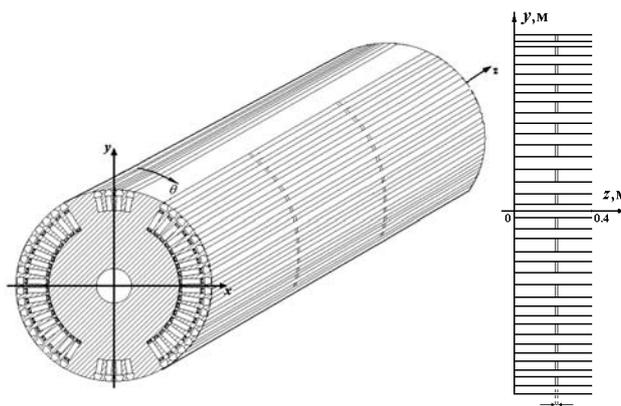


Рис. 6. Конструкция ротора турбогенератора 300 МВт

Рис. 7. Фрагмент конструкции ротора турбогенератора (стыки пазовых клиньев)

В подобласти 2 (см. рис. 3) заданы три равные по величине компоненты плотности постоянного тока стороннего источника  $J_x$ ,  $J_y$  и  $J_z$  ( $10^9 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ ). На обоих торцах расчётной области (см. рис. 7) заданы граничные условия симметрии вида (2) для всех трёх компонент векторного магнитного потенциала ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ). Использование данных граничных условий обосновывается относительно небольшой длиной (40 см) рассматриваемого фрагмента ротора в области стыка клиньев. При этом предполагается, что соседние по длине ротора стыки клиньев находятся в практически одинаковом поле стороннего источника, которое существенно не изменяется по длине ротора на участке длиной 40 см.

На левой и правой вертикальных границах воздушного зазора между клиньями заданы граничные

условия  $A_z = 0$ , что описывает физические условия непротекания электрического тока в направлении оси ротора через воздушный зазор между клиньями.

На рис. 8 приведено полученное распределение осевой компоненты  $A_z$  векторного магнитного потенциала по длине рассматриваемого фрагмента в точках  $C$ ,  $C_1$  и  $C_2$  (см. выше). Вид кривых, представленных на рис. 8, соответствует приведенным выше граничным условиям, описывающим физические особенности протекания нестационарных электромагнитных процессов в роторе турбогенератора. Значительные градиенты осевой компоненты векторного магнитного потенциала в непосредственной близости от воздушного зазора между клиньями приводят к необходимости использования неравномерной конечноэлементной сетки (со сгущением в направлениях стыков) при последующем решении задачи расчета нестационарного трехмерного электромагнитного поля.

Выполнен сравнительный анализ численных результатов расчета стационарного магнитного поля при варьировании разбивки на конечные элементы по длине рассматриваемого фрагмента конструкции ротора. Поперечное сечение расчетной области (см. рис. 3, 4, 6) разбивалось на конечные элементы в соответствии с результатами решения предыдущей задачи (53 узла в направлении оси  $y$ , 27 узлов в окружном направлении, всего 1431 узел). Сравнились результаты, полученные при различном числе узлов в направлении оси  $z$  (значение  $ku3$  в табл. 2). Как следует из анализа результатов, приведенных в табл. 2, величина векторного магнитного потенциала существенно не изменяется при увеличении числа узлов в осевом направлении с 25 до 45 (расхождение не превышает 0.5 %). Следовательно, решение данного частного случая задачи (расчет стационарного магнитного поля в местах стыков пазовых клиньев) целесообразно выполнять на конечноэлементной сетке, содержащей ориентировочно 25 узлов в направлении оси ротора (порядка 35000 – 36000 узлов во всей рассматриваемой конструкции). Увеличение числа узлов приводит к увеличению времени счета без существенного повышения точности численных результатов.

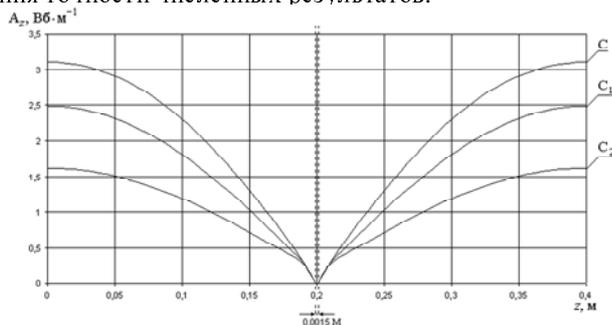


Рис. 8. Распределение осевой компоненты векторного магнитного потенциала по длине фрагмента

Таблица 2

Результаты расчета стационарного магнитного поля в местах стыка пазовых клиньев на различных конечноэлементных сетках (параметры компьютера: 1.73 ГГц, 1.75 Гб)

ku3/kue	$A_z(0) = A_z(0.4 \text{ м}), \text{ Вб} \cdot \text{ м}^{-1}$			Время счета, мин
	$C_2$	$C_1$	$C$	
25/35775	1.61804	2.48061	3.11145	26
45/64395	1.62552	2.485	3.11404	45
47/67257	1.62552	2.485	3.11405	55
57/81567	1.62684	2.48581	3.11456	60
67/95887	1.62764	2.4863	3.11487	68
77/110187	1.62815	2.48662	3.11508	78

## ВЫВОДЫ

В статье описана методика расчета трёхмерных стационарных магнитных полей методом конечных элементов. Показано, что разработанная методика позволяет выполнять компьютерное моделирование трёхмерных стационарных магнитных полей с точностью, достаточной для использования полученных результатов в инженерной практике.

Решены задачи компьютерного моделирования пространственного магнитного поля для упрощенных схем ротора турбогенератора 300 МВт. Выполнен сравнительный анализ численных результатов, полученных на различных конечноэлементных сетках.

Предложенная методика может быть использована для решения прикладных задач расчета пространственного магнитного поля в конструкциях электрических машин и электротехнического оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулон Ж.-Л., Сабонадьер Ж.-К. САПР в электротехнике. – М.: Мир, 1988. – 208 с.
2. Васьяковский Ю.Н., Цивинский С.С., Гайдено Ю.А. Оптимизация концевых клиньев ротора турбогенератора для повышения надёжности его работы в несимметричных режимах. – Электротехника и электромеханика. – 2004, № 3. – С. 26 – 28.
3. Мильх В.И., Поляков И.В., Полякова Н.В., Штангеев Е.И. Расчётно-экспериментальное тестирование программы Femm и преодоление проблем её использования для расчёта магнитного поля электрических машин. – Электротехника и электромеханика. – 2004, № 3. – С. 38 – 43.
4. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радионинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
5. Пантелят М.Г., Шульженко Н.Г. Использование векторного магнитного потенциала в конечноэлементном анализе нестационарных трёхмерных электромагнитных полей в проводящих средах. – Электротехника и электромеханика. – 2007, № 5. – С. 42 – 47.
6. Bíró O., Preis K. On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents. – IEEE Transactions on Magnetics. – 1989, v. 25, No. 4. – P. 3145 – 3159.
7. Bíró O., Preis K., Richter K.R. Various FEM formulations for the calculation of transient 3D eddy currents in nonlinear media. – IEEE Transactions on Magnetics. – 1995, v. 31, No. 3. – P. 1307 – 1312.
8. Pantelyat M.G. Numerical analysis of impulse electromagnetic fields in soft ferromagnetic materials. – International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 1999, v. 10. – P. 185 – 192.
9. Gong L., Unbehauen R. The 3D computations of edge induction heating using semi-analytical method and FEM. – Electrical Engineering. – 1996, v. 79. – P. 189 – 195.
10. Шульженко Н.Г., Зозулин Ю.В., Пантелят М.Г., Руденко Е.К., Петушкова С.А. Влияние материала пазовых клиньев на распределение электромагнитного поля, плотности тока и потерь от токов обратной последовательности в роторе турбогенератора при двухфазном коротком замыкании. – Электротехника и электромеханика. – 2005, № 3. – С. 61 – 64.
11. Пантелят М.Г., Руденко Е.К., Сафонов А.Н., Шульженко Н.Г. Конечноэлементный анализ стационарных магнитных полей в трёхмерной постановке. – Вестник Харьк. нац. ун-та. Сер. "Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления". – 2009, вып. 11, № 847. – С. 292 – 306.

Поступила 19.05.2009

Шульженко Николай Григорьевич, д.т.н., проф.,  
Пантелят Михаил Гарриевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.,  
Руденко Елена Константиновна, к.т.н.,  
Сафонов Александр Николаевич  
Институт проблем машиностроения НАН Украины  
Украина, 61046, Харьков, ул. Дм. Пожарского, 2/10  
тел. (0572) 94-27-01, 95-95-46, факс (0572) 94-46-35,  
e-mail: SHULZH@ipmach.kharkov.ua

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА МАССИВНЫХ ОДНОРОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИСКРОВЫХ ВОЗДУШНЫХ КОММУТАТОРОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

*Приведено результати наближеної розрахункової кількісної оцінки маси викинутого матеріалу за один іскровий розряд і питомого електричного зносу для масивних сталевих електродів-анодів високовольтних іскрових повітряних коммутаторів атмосферного тиску, що випробують дію великих імпульсних загасаючих синусоїдальних струмів мікросекундного тимчасового діапазону.*

*Приведены результаты приближенной расчетной количественной оценки массы выброшенного материала за один искровой разряд и удельного электрического износа для массивных стальных электродов-анодов высоковольтных искровых воздушных коммутаторов атмосферного давления, испытывающих воздействие больших импульсных затухающих синусоидальных токов микросекундного временного диапазона.*

### ВВЕДЕНИЕ

Управляемые (неуправляемые) высоковольтные сильноточные искровые коммутаторы (ВСИК) с газовой (воздушной) изоляцией повышенного или атмосферного давления в рабочем промежутке между их основными массивными металлическими электродами нашли широкое практическое применение в составе высоковольтных электрофизических установок (ВЭФУ), используемых в технике высоких напряжений, больших импульсных токов (БИТ), сильных электрических и магнитных полей для решения многих научных и технологических задач [1-7]. Импульсные искровые разряды, происходящие между основными металлическими электродами данных сильноточных газовых разрядников, многократно коммутирующих в разрядных цепях ВЭФУ микро- и миллисекундные импульсы тока амплитудой от единиц до сотен килоампер, вызывают активную электрическую эрозию электродов ВСИК [8-11]. Данная эрозия разрушает рабочие поверхности металлических электродов, выполняемых из разных материалов с различными температурами их кипения (например, из тугоплавких металлов, вольфрамово-медных композиций и других материалов), и приводит к ухудшению коммутационных характеристик ВСИК (например, к изменению статического напряжения их срабатывания, изменению времени коммутации и снижению показателей надежности их работы в составе ВЭФУ) [1, 2, 12, 14]. Исследованию процессов электрической эрозии металлических электродов ВСИК посвящен многочисленный ряд работ [12-15]. Несмотря на это, слабоосвещенной с расчетных и экспериментальных позиций областью при изучении электрической эрозии металлических электродов ВСИК остается инженерная оценка электроэрозионного износа их рабочих поверхностей при воздействии на электроды БИТ различных амплитудно-временных параметров (АВП) и вытекающие из нее практические рекомендации по продлению срока службы указанных ВСИК.

Целью данной статьи является расчетная оценка потери массы и удельного износа для массивных металлических электродов ВСИК, применяемых в разрядных цепях мощных ВЭФУ с емкостными накопителями энергии (ЕНЭ) в режиме их затухающего синусоидального разряда на электрическую нагрузку.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим массивные металлические однородные электроды ВСИК, через которые при коммутации сильноточных цепей ВЭФУ с ЕНЭ протекает БИТ с АВП, характерными для колебательного разряда ЕНЭ на активно-индуктивную нагрузку. Ограничимся исследованием случая, когда габаритные размеры (наружный радиус  $R_k$  или толщина  $h_k$ ) электродов ВСИК значительно превышают глубины проникновения в них электромагнитного и теплового полей, создаваемых каналом искрового разряда в зонах его привязки на их рабочих поверхностях (рис. 1). Считаем, что рассматриваемые электроды могут быть выполнены из различных материалов, характеризующихся соответствующими уровнями приэлектродного падения напряжения  $U_k$ , практически не зависящими от АВП протекающего через них БИТ [16]. Полагаем, что значения  $U_k$  определяются видом материала электрода и полярностью приложенного к нему электрического напряжения (потенциала) от ЕНЭ ВЭФУ [16]. В этой связи принимаем, что исследуемые основные электроды ВСИК, расположенные на расстоянии  $l_k$  друг от друга при нормальных условиях в окружающей их воздушной среде атмосферного давления (воздушное давление составляет  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а температура воздуха равна  $0$  °С [17]), образуют двухэлектродную систему (ДЭС), состоящую из катода (отрицательно заряженного электрода, имеющего избыток свободных электронов) и анода (положительно заряженного электрода, имеющего недостаток свободных электронов). Пусть при приложении к воздушной ДЭС исследуемого разрядника электрического напряжения  $U_{ok}$  катоду соответствует приэлектродное падение напряжения  $U_{kk}$ , а аноду – напряжение  $U_{ka}$ . Считаем, что после электрического пробоя воздушного промежутка между основными электродами ВСИК и воздействия образующейся в искровом канале низкотемпературной плазмы с усредненной в нем по поперечному сечению амплитудной плотностью затухающего синусоидального тока  $\delta_{om}$  на их рабочие поверхности в воздушной ДЭС коммутатора на атомарном уровне происходит перенос испарившейся массы материала с анода на катод. На аноде от воздействия на него интенсивного теплового потока (с усредненной амплитудной плотностью  $q_{om}$ ) плаз-

менного канала искрового разряда и последующей локальной сублимации его материала образуются лунки (кратеры) [10], геометрическая форма которых близка к форме шарового сегмента [11, 15].

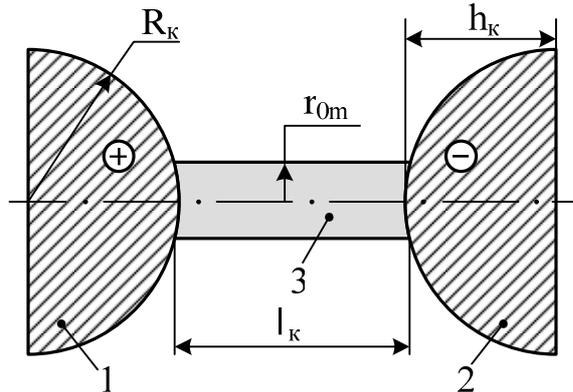


Рис. 1. Схематическое изображение массивных металлических электродов воздушного ВСИК, испытывающих воздействие БИТ (1,2 – основные электроды коммутатора, являющиеся анодом и катодом ДЭС; 3 – канал искрового сильноточного воздушного разряда радиусом  $r_{0m}$  и длиной  $l_k$ )

Количество испарившегося вещества из лунки анода, которое осело после прохождения искрового разряда на его наружной поверхности, пренебрегаем. В обоснование такого приближенного механизма электрической эрозии электродов ВСИК укажем, что после локального испарения в круговой опорной зоне на аноде радиусом, примерно равным максимальному радиусу  $r_{0m}$  канала искрового разряда между электродами ВСИК [15], и ионизации выброшенных микрочастиц материала с электрода-анода, интенсивно бомбардируемого ускоренными электронами в рабочем воздушном промежутке ДЭС с усредненной напряженностью электрического поля  $E_{0k} = U_{0k} / l_k$ , испарившиеся атомы материала с анода ВСИК из-за протекания в них активной термоэлектронной эмиссии [18] приобретают положительный потенциал и начинают движение в сторону электрода-катода коммутатора. Достигнув катода, они образуют на его рабочей поверхности "рельефообразные наслоения" (в случае  $R_k > r_{0m}$ ) или "конусообразные наросты" с вершиной в сторону анода (в случае  $R_k < r_{0m}$ ), характеризующиеся высокой температурой плавления и механической прочностью. Об этом свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, наблюдаемые как автором на действующих ВЭФУ с воздушными ВСИК, так и описанные ранее в научно-технической литературе другими исследователями электрической эрозии металлических электродов ВСИК [1, 13]. Требуется с учетом принятых допущений и изложенных положений выполнить расчетную оценку удельного электрического износа  $F_k$  однородного металлического электрода-анода ВСИК, равного отношению массы  $M_k$  выброшенного из лунки анода материала за один затухающий колебательный разряд ЕНЭ в сильноточной цепи ВЭФУ к количеству  $Q_k$  протекшего при этом через металлические электроды ВСИК электричества (электрического заряда).

## 2. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

**Оценка потери массы  $M_k$  электродом коммутатора от действия сильноточной искры.** Массу  $M_k$  сублимируемого металла из электрода-анода ВСИК за один электрический разряд через него мощного ЕНЭ в сильноточной цепи ВЭФУ определим, как и в [15], из следующего приближенного соотношения:

$$M_k = U_{ka} Q_k d_{ka} / W_{ca}, \quad (1)$$

где  $d_{ka}$  – плотность материала электрода-анода ВСИК;  $W_{ca}$  – удельная энергия (теплота) сублимации для материала электрода-анода ВСИК.

Численные значения для приэлектродного падения напряжения  $U_{ka}$  и вероятных минимальных уровней усредненной плотности теплового потока  $q_{0m}$  в канале искрового разряда радиусом  $r_{0m}$  на основании данных работ [16, 19] применительно к используемому на практике ряду материалов электрода-анода ВСИК сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения  $U_{ka}$  и  $q_{0m}$  для ряда металлов и сплавов, используемых при изготовлении электродов-анодов ВСИК [16,19]

Наименование материала анода	Величина $U_{ka}$ , В	Величина $q_{0m}$ , Вт/м <sup>2</sup>
Сталь 3	6,1	$1,8 \cdot 10^8$
Алюминий	8,2	$2,1 \cdot 10^8$
Латунь Л62	8,0	$2,6 \cdot 10^8$
Медь	8,6	$3,3 \cdot 10^8$

Что касается численных значений для удельной энергии сублимации  $W_{ca}$  и вероятных минимальных уровней усредненной плотности импульсного тока  $\delta_{0m}$  в канале воздушного искрового разряда радиусом  $r_0$  для электрода-анода ВСИК, то они с учетом результатов работ [3, 15, 16] для некоторых металлов и сплавов могут быть представлены в виде табл. 2.

Таблица 2

Значения  $W_{ca}$  и  $\delta_{0m}$  для ряда металлов и сплавов, используемых при изготовлении электродов-анодов ВСИК [3, 15, 16]

Наименование материала анода	Величина $W_{ca}$ , Дж/м <sup>3</sup>	Величина $\delta_{0m}$ , А/м <sup>2</sup>
Сталь 3	$5,56 \cdot 10^{10}$	$28 \cdot 10^6$
Алюминий	$2,29 \cdot 10^{10}$	$25 \cdot 10^6$
Латунь Л62	$2,98 \cdot 10^{10}$	$32 \cdot 10^6$
Медь	$4,68 \cdot 10^{10}$	$38 \cdot 10^6$

Указанные в табл. 1 и 2 ориентировочные минимальные значения для плотности теплового потока  $q_{0m}$  и плотности импульсного тока  $\delta_{0m}$  в искровом канале ВСИК, характерные для длительной аperiodической составляющей тока молнии амплитудой  $I_{mC} \leq 1$  кА при ее длительности  $\tau_{uc}$  в сотни микросекунд [7, 16], с целью своих необходимых уточнений в дальнейшем применительно к рассматриваемому здесь случаю (биполярные токи амплитудой  $I_{mA} \geq 100$  кА при их длительности  $\tau_{uA}$  в сотни микросекунд, характерные для импульсной составляющей тока молнии [7, 11]) требуют приведения ниже расчетного соотношения для радиуса  $r_{0m}$  канала сильноточной искры в разряд-

ном воздушном промежутке длиной  $l_k$  ВСИК при принятом затухающем синусоидальном разряде мощного ЕНЭ через металлические электроды рассматриваемого воздушного коммутатора в цепи ВЭФУ [15]:

$$r_{0m} = 0,093(I_{mA})^{1/3}(t_{mA})^{1/2}, \quad (2)$$

где  $t_{mA}$  – время, соответствующее амплитуде  $I_{mA}$  разрядного затухающего синусоидального тока ЕНЭ в силовоточной цепи ВЭФУ.

Согласно выражения (2), полученного на основе известной формулы Брагинского для радиуса сильнооточной искры [7, 11], при  $I_{mA} = 212$  кА и  $t_{mA} = 34$  мкс, отвечающим реальным условиям работы ВСИК со стальными основными электродами при натурных испытаниях технических объектов на молниестойкость [7, 11], величина радиуса  $r_{0m}$  искрового канала составляет значение, примерно равное 32,3 мм. Тогда для усредненной амплитудной плотности импульсного тока  $\delta_{0m}$ , воздействующей на стальной электрод-анод ВСИК, из соотношения вида  $\delta_{0m} = I_{mA} / \pi r_{0m}^2$  получаем величину, численно равную около  $64,7 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>. Видно, что полученное нами численное значение для  $\delta_{0m}$  более чем в два раза превышает плотность тока, указанную в табл. 2 для рассматриваемого электрода ВСИК. Данный результат для  $\delta_{0m}$  позволяет уточнить и численное значение для усредненной плотности теплового потока  $q_{0m}$ , воздействующей в исследуемом случае на рабочую поверхность стального электрода-анода ВСИК и рассчитываемой по следующему выражению [16, 20]:

$$q_{0m} = \delta_{0m} U_{ka}. \quad (3)$$

Воспользовавшись численными данными табл. 1 для  $U_{ka}$ , при  $\delta_{0m} = 64,7 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> ( $I_{mA} = 212$  кА;  $t_{mA} = 34$  мкс;  $r_{0m} = 32,3$  мм) из (3) для  $q_{0m}$  находим, что усредненная амплитудная плотность теплового потока в опорной зоне канала искрового разряда на рабочей поверхности стального анода ВСИК в нашем случае оказывается равной  $3,95 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. Полученный количественный результат для  $q_{0m}$  примерно в 2,2 раза больше соответствующей величины, приведенной в табл. 1 для стального электрода.

Определившись с такими важными для анализа процесса электрической эрозии и износа металлических электродов ВСИК параметрами как максимальный радиус  $r_{0m}$  канала искрового воздушного разряда в опорной зоне на аноде, усредненная амплитудная плотность импульсного тока  $\delta_{0m}$  в канале разряда, усредненная амплитудная плотность теплового потока  $q_{0m}$  в канале искрового разряда, приэлектродное падение напряжения вблизи анода  $U_{ka}$  и удельная энергия сублимации  $W_{ca}$  для материала электрода-анода, остановимся на определении для (1) количества электричества  $Q_k$ , протекшего через рассматриваемые электроды ВСИК. С этой целью используем классическое выражение для нахождения величины электрического заряда  $Q_k$ , коммутируемого в импульсном режиме в разрядной цепи мощного ЕНЭ рассматриваемым нами ВСИК, в следующем виде [1]:

$$Q_k = \int_0^{\tau_{uA}} i_k(t) dt, \quad (4)$$

где  $i_k(t) = k_A I_{mA} \exp(-\delta_A t) \sin(\omega_A t)$  – затухающий синусоидальный ток в разрядной цепи ЕНЭ [15, 18];  $k_A = [\exp(-\delta_A \omega_A^{-1} \text{arcctg } \delta_A \omega_A^{-1}) \sin(\text{arcctg } \delta_A \omega_A^{-1})]^{-1}$  – нормирующий коэффициент [18];  $\delta_A$ ,  $\omega_A$  – соответственно коэффициент затухания и круговая частота тока, протекающего через электроды коммутатора;  $\tau_{uA}$  – длительность протекания через электроды коммутатора импульсного тока;  $t$  – текущее время.

**Пример расчета удаленной искровой массы  $M_k$  для стального электрода коммутатора.** Остановимся на реальной конструкции управляемого трехэлектродного каскадного воздушного разрядника на 50 кВ типа ТКВР-50, созданного сотрудниками НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" с участием автора в 2007 году и применяемого сейчас при формировании нормированной импульсной А компоненты тока молнии, АВП которой были ранее указаны в [7, 21]. Внешний вид данного воздушного ВСИК, содержащего аналогично схеме рис. 1 массивные полусферические стальные (Ст. 3) основные электроды, приведен на рис. 2.

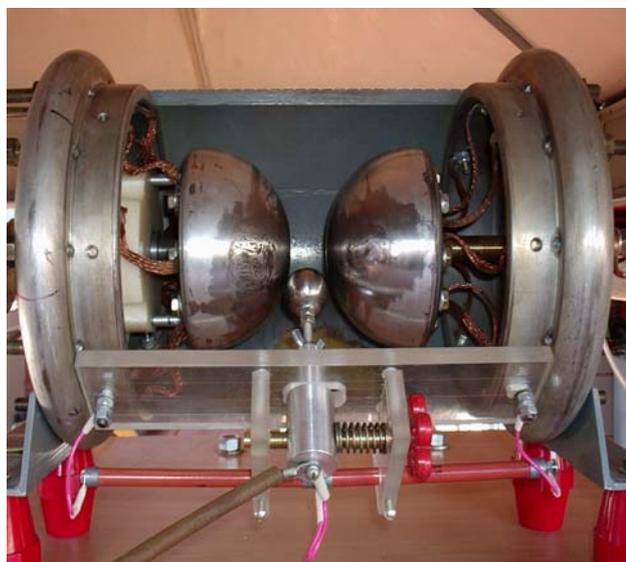


Рис. 2. Внешний вид ВСИК на 50 кВ типа ТКВР-50, содержащего два полусферических основных  $\varnothing 123$  мм и один шаровой управляющий  $\varnothing 30$  мм стальные электроды

На рис. 3 показана типичная осциллограмма затухающего синусоидального разрядного тока  $i_k(t)$  в силовоточной цепи мощного ЕНЭ (при его зарядном напряжении  $U_{3A} = -27,4$  кВ; емкости  $C_A = 336$  мкФ; индуктивности  $L_A = 2,05$  мкГн; активном сопротивлении  $R_A = 0,061$  Ом [7, 21]), имитирующего с помощью ВСИК типа ТКВР-50 импульсную А составляющую тока молнии на эквиваленте электрической RL-нагрузки ( $R_H = 0,05$  Ом;  $L_H = 1$  мкГн [7, 21]). Измерение АВП приведенного на рис. 3 импульсного тока  $i_k(t)$  было выполнено при помощи аттестованного шунта типа ШК-300, имеющего при этом на выходе коэффициент преобразования, равный 11261 А/В [7, 21].

Расшифровка АВП токовой осциллограммы на рис. 3 и использование соотношения (4) показывают, что в данном конкретном случае колебательного разряда ( $\omega_A = 34,15 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>;  $\delta_A = 1,495 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>;  $k_A = 1,812$ ) модуль величины электрического заряда  $Q_k$ , протек-

шего через основные электроды ВСИК, при  $I_{mA} = -212$  кА и  $\tau_{uA} = 500$  мкс оказывается примерно равным 9,21 Кл. Тогда из (1) при  $U_{ka} = 6,1$  В,  $d_{ka} = 7,82 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $|Q_k| = 9,21$  Кл и  $W_{ca} = 5,56 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> масса металла, выброшенная искрой из стального электрода-анода за один сильноточный искровой разряд в рабочем воздушном промежутке ВСИК составит величину, равную около  $M_k = 7,9$  мг.

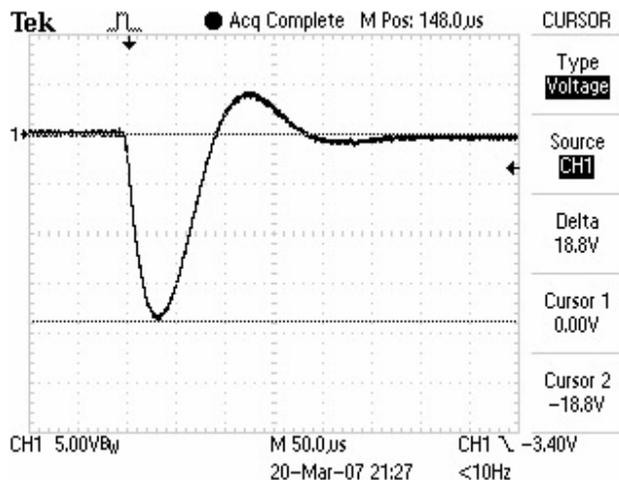


Рис. 3. Осциллограмма разрядного тока мощного ЕНЭ в сильноточной цепи ВЭФУ, полученная с использованием воздушного ВСИК атмосферного давления типа ТКВР-50 со стальными основными электродами и активно-индуктивной нагрузки ( $I_{mA} = -212$  кА;  $t_{mA} = 34$  мкс;  $\tau_{uA} = 500$  мкс) [7, 21]

На рис. 4 хорошо видны последствия такого сублимационного уноса материала со стального электрода-анода исследуемого ВСИК. При количестве  $N_p$  сильноточных искровых разрядов в ВСИК с одинаковыми АВП их токов общая потеря массы его электродом-анодом будет примерно равной  $M_{kp} = N_p \cdot M_k$ . Из практики эксплуатации воздушного ВСИК типа ТКВР-50 следует, что для исключения заметного влияния на его работу последствий электрической эрозии собственных электродов и сохранения стабильности работы разрядника в сильноточной цепи мощного ЕНЭ, используемого при имитации импульсной А компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП [7, 21], основные стальные электроды данного коммутатора после воздействия на них сильноточных искровых разрядов в количестве, равном не более  $N_p = 30$ , необходимо тщательно защищать и полировать [7].

#### Оценка удельного износа $F_k$ электрода коммутатора.

Из (1) для удельного электрического износа  $F_k$  электрода-анода рассматриваемого воздушного ВСИК получаем следующее выражение:

$$F_k = U_{ka} d_{ka} / W_{ca} \quad (5)$$

Из (5) видно, что чем больше значение удельной энергии сублимации  $W_{ca}$  для материала электрода-анода, тем меньше и его удельный износ  $F_k$ , обусловленный воздействием на него низкотемпературной плазмы искрового разряда.

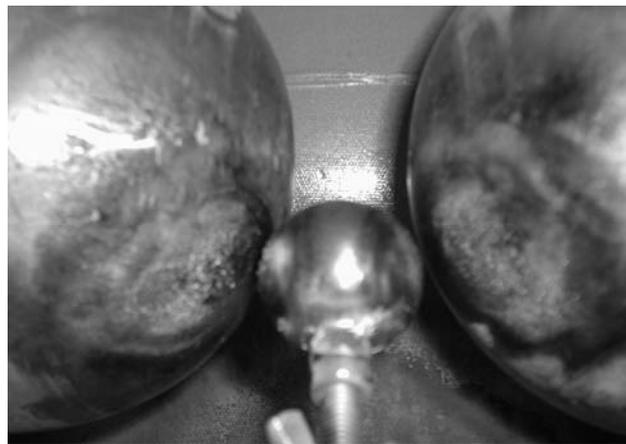


Рис. 4. Внешний вид электроэрозионных следов на массивных стальных основных электродах наружным радиусом  $R_k = 61,5$  мм (слева – анод, справа – катод, а по центру – управляющий стальной электрод  $\varnothing 30$  мм) трехэлектродного воздушного разрядника на 50 кВ типа ТКВР-50 после прохождения через них одного затухающего синусоидального импульса тока амплитудой  $I_{mA} = -212$  кА при  $t_{mA} = 34$  мкс с длительностью протекания около  $\tau_{uA} = 500$  мкс [7, 21]

При оценке  $F_k$ , безусловно, необходимо принимать во внимание согласно (5) не только одну величину  $W_{ca}$  (изменяется от  $2,29 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> – для алюминия до  $9,28 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> – для вольфрама [3,15]), но и ее соотношение с такими величинами как приэлектродное падение напряжения  $U_{ka}$  (для сильноточных разрядов изменяется незначительно и принимает для различных металлических материалов численные значения от 5 до 10 В [20]) и плотность материала электрода-анода  $d_{ka}$  (изменяется от  $2,71 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – для алюминия до  $19,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – для вольфрама [17]). Численная оценка по (5) значений  $F_k$  показывает, что для исследуемого массивного стального электрода-анода ВСИК на напряжение 50 кВ типа ТКВР-50, предназначенного для коммутации импульсных микросекундных токов с длительностью  $\tau_{uA} \leq 500$  мкс и амплитудой  $I_{mA}$  до 300 кА [7], при  $U_{ka} = 6,1$  В,  $d_{ka} = 7,82 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $W_{ca} = 5,56 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> удельный электроэрозионный износ его основных электродов может принимать значение около  $8,58 \cdot 10^{-4}$  г/Кл. Отметим, что согласно опытным данным [22] удельный электрический износ  $F_k$  для металлокерамических основных электродов управляемых высоковольтных газоразрядных (воздушных) сильноточных разрядников на напряжение 50 кВ типа РГУ1-50-100 (рассчитаны на коммутацию импульсных микросекундных токов при  $\tau_{uA} \leq 100$  мкс амплитудой  $I_{mA}$  до 100 кА), выполненных на основе металлокерамики "вольфрам-медь", составляет около  $4,4 \cdot 10^{-5}$  г/Кл. Повышенная электроэрозионная стойкость металлокерамики по сравнению с однородными металлическими электродами (например, рассматриваемыми нами массивными стальными электродами в ВСИК типа ТКВР-50) может быть связана с повышенными удельными потерями энергии на локальное испарение (сублимацию) в зоне привязки искрового канала на ее наружной поверхности одной из компонент такого компо-

зиционного материала (например, меди) и затрудненным выбросом из этой металлокомпозиции жидкой фазы [20]. Этой устоявшейся научной точке зрения в теории электрической эрозии сильноточных электродов удовлетворяют и предлагаемые автором простые по структуре расчетные формулы (1) и (5) для приближенной оценки соответственно массы  $M_k$  эрозируемого металла за один сильноточный искровой разряд и удельного электроэрозионного износа  $F_k$  для массивных однородных металлических электродов воздушных ВСИК атмосферного давления.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложены соотношения для приближенной расчетной оценки убыли массы  $M_k$  ( $M_{kP}$ ) и удельного электроэрозионного износа  $F_k$  массивных металлических однородных электродов воздушного ВСИК атмосферного давления, испытывающих воздействие сильноточных искровых разрядов, АВП импульсных токов которых характеризуются амплитудами  $I_{mA}$  в десятки (сотни) килоампер, временем нарастания до токовых амплитуд  $t_{mA}$  в десятки микросекунд и длительностями протекания  $\tau_{IA}$  в сотни микросекунд.

2. Полученные количественные результаты для  $M_k$ ,  $M_{kP}$ , и  $F_k$  не противоречат известным данным экспериментальных исследований электрической эрозии сильноточных электродов воздушных коммутаторов мощных ВЭФУ под действием БИТ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова.- М.: Атомиздат, 1970.-472с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972.-391 с.
3. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии/ Под ред. В.Н. Карнюшина. Минск: Наука и техника, 1983.-151 с.
4. Гулий Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.- Киев: Наукова думка, 1990.-208 с.
5. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Высоковольтные искровые разрядники для технологических установок// Приборы и техника эксперимента.-2001.-№2.-С. 79-88.
6. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко Ю.П. и др. Высоковольтные сильноточные искровые коммутаторы для генераторов импульсных напряжений и токов// Технічна електродинаміка.-2003.-№3.- С. 41-47.
7. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов// Приборы и техника эксперимента.-2008.- №3.- С. 81-85.
8. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления.- М.: Энергия, 1978. - 456 с.
9. Намитоков К.К. Электронно-микроскопическое и рентгенографическое исследование продуктов электрической эрозии металлов// Украинский физический журнал.-1961.-Т.6.-№4.- С. 556-563.
10. Намитоков К.К. О строении и составе отдельных лунок разрушения поверхности электродов импульсным разрядом// Украинский физический журнал.-1962.-Т.7.-№10. - С. 1139-1141.
11. Баранов М.И. Расчет кратера электротеплового разрушения на металлической обшивке летательного аппарата при прямом ударе в нее молнии// Електротехніка і електромеханіка.-2003.- №4.- С. 101-103.
12. Белкин Г.С., Киселев В.Я. Влияние материала электродов на эрозию при сильных токах// Журнал технической физики.-1967.-Т.37.-№5.-С. 977-979.
13. Белкин Г.С., Киселев В.Я. Особенности эрозии электродов при больших импульсных токах// Журнал технической физики.-1967.-Т.37.-№5.-С. 996-998.
14. Зорин В.Б., Головина У.Ю., Мазурин И.М. и др. Эрозия электродов при сильноточном мегавольтном разряде в элегазе// Журнал технической физики.-1986.-Т.56.-№5. - С. 926-929.
15. Баранов М.И. Приближенный расчет электрической эрозии металлических электродов высоковольтных сильноточных искровых коммутаторов // Технічна електродинаміка.- 2004.- №5. - С. 11-14.
16. Абрамов Н.Р., Кужекин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии// Электричество.-1986.-№11. - С. 22-27.
17. Кухлинг Х. Справочник по физике/ Пер. с нем.- М.: Мир, 1982.-520 с.
18. Баранов М.И. Термоэлектронная эмиссия из металла при нагреве и электрическом взрыве проводников под воздействием больших импульсных токов// Технічна електродинаміка.-2008.-№3.-С. 3-8.
19. Абрамов Н.Р. Расчет теплового воздействия канала молнии на металлические объекты// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.-1986.-№1.-С. 118-126.
20. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А. и др. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов.- М.: Энергия, 1978.- 256 с.
21. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии и ее применение в области молниезащиты технических объектов // Електротехніка і електромеханіка.-2008.-№3.-С. 69-75.
22. Ермилов И.В. Разработка комплекса высоковольтного сильноточного оборудования нового поколения для магнитно-импульсной обработки материалов// Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007).- С. 88-98.

Поступила 14.07.2008

*Баранов Михаил Иванович*, 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

## РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМАХ СРАБАТЫВАНИЯ ТРИГАТРОНОВ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ (ОБЗОР)

У статті за результатами аналізу літературних джерел показано розвиток уявлень щодо механізмів пробоя тригатронів, особливу увагу приділено часу запізнення  $t_z$ , пробоя тригатрону та його розкиду  $\Delta t_z$ .

В статті по результатах аналізу літературних джерел показано розвиток представлень о механізмах пробоя тригатронів, особе внимание уделено времени  $t_z$  запоздывания пробоя тригатронів и его разбросу  $\Delta t_z$ .

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Тригатронные искровые разрядники в ряду высоковольтных коммутаторов занимают особое место благодаря присущим им достоинствам:

1. Широкий диапазон рабочих напряжений (от нескольких киловольт до нескольких мегавольт) и коммутируемых токов (от десятков ампер до единиц мегаампер).

2. Диапазон устойчивого управления – от 0,3 до 1,0 напряжения самопробоя  $U_{сп}$ .

3. Возможность получения субнаносекундного разброса времени  $\Delta t_z$  срабатывания вплоть до напряжений порядка нескольких мегавольт, что позволяет использовать тригатроны при параллельной работе.

4. Технологичная, простая и удобная конструкция – управляющий электрод (УЭ) расположен в отверстии, выполненном в одном из основных электродов (ОЭ).

Из-за простоты устройства и перечисленных характеристик надежной работы тригатроны нашли широкое применение не только в экспериментальной технике, но и в технологических электроустановках, область использования которых все больше расширяется. Знание механизма инициирования пробоя тригатронов поможет разработчикам оптимальным образом выбрать конструкцию и получить требуемые характеристики тригатрона. Это, в свою очередь, позволит создать перспективные генераторы высоковольтных импульсов, необходимые для модернизации существующих электротехнологий и для разработки новых.

На рис. 1 приведено схематическое изображение тригатрона, где: 1, 2 – ОЭ; 3 – УЭ; 4 – изолирующая втулка (необязательный элемент тригатрона). Тригатрон в управляемом режиме срабатывает в том случае, если приложенный к стержневому электроду 3 управляющий высоковольтный импульс напряжения  $U_{упр}$  вызывает пробой поджигающего промежутка  $d$  и инициирует пробой основного промежутка  $D$ , к которому предварительно приложено напряжение  $U_0$ , меньшее, чем напряжение самопробоя тригатрона  $U_{сп}$ . Устройство тригатрона впервые было предложено Л.И. Ивановым и И.С. Стекольниковым [1]. Детальное изучение процессов, происходящих в тригатроне, показывает, что подсветка от поджигающего промежутка во многих случаях имеет лишь вспомогательное значение, разряд же инициируется в основном другими факторами.

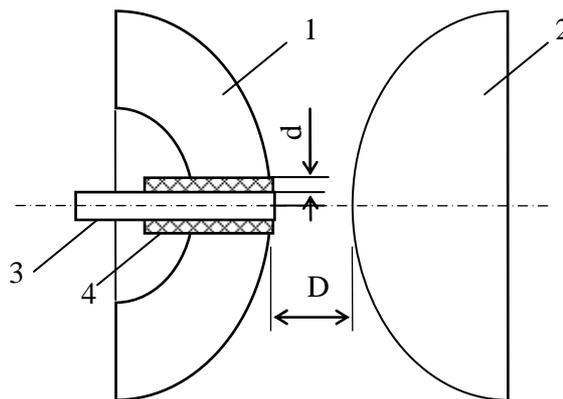


Рис. 1

### ЦЕЛЬ СТАТЬИ

На основе анализа существующих конструкций тригатронов, процессов, происходящих в них, и их характеристик обосновать выбор оптимальной конструкции и выработать требования к тригатронам, параллельная работа которых может обеспечить коммутацию мощностей порядка 1 ТВт и более.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Характеристики тригатронов зависят от:

- величины и полярности напряжения между ОЭ – главного искрового промежутка (ГИП);
- амплитуды, полярности и формы управляющего импульса напряжения;
- конструкции: формы и геометрических размеров ОЭ и УЭ, длины поджигающего и основного разрядных промежутков;
- расположения УЭ в низковольтном или высоковольтном ОЭ;
- параметров разрядного контура.

Сначала рассмотрим работу тригатрона в воздухе при атмосферном давлении. Существуют три точки зрения на механизм инициирования разряда в тригатронах. В публикациях о первой из них, например, [2] в 1962 г. автор склоняется к мнению, что возбуждение разряда в ГИП происходит в результате фотоионизации в объеме, вызванной коротковолновым излучением от искры поджигающего разряда. Считается, что возникшие фотоэлектроны вызывают образование электронных лавин, преобразующихся в дальнейшем в пробивные стримеры.

В публикациях [3] 1957 г. и [4] 1962 г. рассматривается второй механизм инициирования разряда в

тригатроне. В соответствии с ним разряд возбуждается вследствие роста ударной ионизации в области пониженной плотности, возникающей при протекании тока поджига. Более мощному поджигу соответствуют больший диапазон рабочих напряжений тригатрона и меньшие времена запаздывания  $t_3$  срабатывания.

Однако указанные представления не в состоянии удовлетворительно объяснить некоторые характеристики тригатрона. В первом механизме неясно за счет чего развиваются эффективные с точки зрения формирования разряда электронные лавины, когда напряженность электрического поля в ГИП ниже статической пробивной. Пришлось бы допустить, что поджигающий разряд обеспечил путем фотоионизации концентрацию положительных ионов, соизмеримую с критической, которая необходима для формирования стримера, что маловероятно. Процесс возникновения области малой плотности газа, будучи по своей природе сравнительно инерционным, не может объяснить происхождение малых  $t_3$  в тригатроне – доли микро-секунды. Кроме того, оба механизма не в состоянии объяснить и такое известное и важное свойство тригатрона, как влияние полярности основного напряжения и управляющего импульса на время  $t_3$  срабатывания.

Одной из предпосылок для гипотезы относительно третьего механизма инициирования послужил экспериментально установленный в исследовании [5] факт возможного инициирования разряда в тригатроне до момента пробоя поджигающего промежутка.

Шкурюпат П.И. [5] первым дал объяснение третьего механизма инициирования пробоя тригатрона в 1960 г. Вкратце его можно изложить так [6, С. 196]. Если к ГИП тригатрона приложено напряжение  $U_0$  ниже статического разрядного  $U_{ст}$ , то напряженность электрического поля у ОЭ и УЭ ниже критической  $E_k$  (60–70 кВ/см). В этих условиях в ГИП не могут развиваться самоподдерживающиеся ионизационные процессы. В момент приложения к УЭ высоковольтного управляющего импульса  $U_{упр}$  в непосредственной близости от этого электрода происходит резкое изменение электрического поля.

Величина и характер этого изменения определяются величиной и полярностью управляющего импульса относительно основного напряжения, а также геометрией поджигающего промежутка. Если изменение электрического поля приводит к усилению его напряженности свыше  $E_k$ , хотя бы в небольшой части разрядного промежутка, то могут возникнуть ионизационные процессы, приводящие к пробоя ГИП.

Кроме резкого усиления напряженности электрического поля у кончика УЭ одновременно возрастает разность потенциалов между УЭ и ОЭ. Из-за возрастания напряженности поля возле УЭ возникает самоподдерживающийся ионизационный процесс, обеспечивающий развитие разряда к противоположному ОЭ. В момент замыкания указанных электродов предразрядным каналом, поскольку УЭ отделен от генератора управляющих импульсов конечным импедансом, УЭ (если он встроен в низковольтный ОЭ) приобретает высокий потенциал. Поэтому одновременно с пробоем промежутка 2 – 3 (см. рис. 1) происходит пробой поджигающего промежутка  $d$  (1 – 3), и

ток контура замыкается между ОЭ.

Автором [5] экспериментально было показано, что ток в ГИП возникает одновременно с пробоем поджигающего промежутка. Это означает, что инициирование разряда в ГИП не вызвано пробоем поджигающего промежутка.

В случае опережающего пробоя [7, С. 35] промежутка между УЭ и противоположным ОЭ начальная стадия разряда формируется в системе "стержень (УЭ) – плоскость (ОЭ)". В такой системе наименьшее пробивное напряжение и соответственно наименьшее время  $t_3$  соответствует положительной полярности стержня. Именно при положительной полярности стержневого УЭ и отрицательной полярности противоположного ОЭ получено наименьшее, согласно [7], время  $t_3$  тригатрона, что говорит в пользу "потенциального", а не "искрового" механизма инициирования пробоя тригатрона.

В [8, 9] установлено, что время  $t_3$  оказывается минимальным в том случае, когда пробой обоих промежутков происходит практически одновременно, лишь с небольшим опережением пробоя в ГИП.

#### ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИГАТРОНА

Разброс времени  $\Delta t_3$  запаздывания срабатывания является важной характеристикой тригатрона. Минимальная величина  $\Delta t_3$  позволяет использовать тригатроны для параллельного включения нескольких накопителей с целью достижения на нагрузке больших амплитуд токов – порядка десятков мегаампер.

Проанализируем обстоятельства и факторы, влияющие на достижение минимального  $\Delta t_3$  в тригатроне. Очевидно, минимальное  $\Delta t_3$  достигается при минимальном  $t_3$ , а минимальный разброс времени коммутации  $\Delta t_k$  – при минимальном  $t_k$ . Время срабатывания  $t_c$  тригатрона как и любого другого управляемого разрядника, складывается из времени  $t_3$  запаздывания и времени коммутации  $t_k$ :  $t_c = t_3 + t_k$ .

Как известно [6, С. 177], время  $t_3$  запаздывания срабатывания состоит из статистического времени  $t_{ст}$  запаздывания и времени развития и формирования  $t_{рф}$  предразрядного канала.

Время  $t_{ст}$  (интервал времени от момента достижения статического разрядного напряжения до появления начального электрона, способного вызвать самоподдерживающийся разряд) определяется величиной напряженности электрического поля, геометрией разрядного промежутка и степенью предварительной ионизации или облучения промежутка.

Для минимизации  $t_{ст}$  следует в ГИП выбирать напряженность электрического поля  $E$ , близкую к пробивной, что увеличивает вероятность появления эффективных электронов. Однако при наличии сильного постоянного электрического поля между ОЭ [6, С. 207] концентрация отрицательных ионов (способных быть источником электронов вследствие их отрыва) в ГИП оказывается недостаточной, и процесс начинается при  $E$ , существенно превосходящей  $E_k$ . Поэтому обычно в воздушных разрядниках (использование воздушной изоляции удешевляет электротехнологические установки) в ГИП выбирают градиент  $\sim 20$  кВ/см, чтобы уменьшить вероятность самопроиз-

вольного срабатывания, что крайне важно при параллельной работе многих разрядников. При самопроизвольном срабатывании одного из разрядников в этом случае вся энергия, запасенная в накопителях, коммутируется через него в нагрузку. Это снижает амплитуду тока в нагрузке, увеличивает индуктивность разрядного контура и может привести к выходу из строя самого разрядника.

Появлению свободных электронов [6, С. 207] в ГИП и уменьшению  $t_{ст}$  способствует его подсветка коротковолновым излучением, способным вызвать фотоионизацию в объеме (длина волны излучения для воздуха  $79 \div 145$  нм) и фотоэлектронную эмиссию с поверхности катода ( $260 \div 300$  нм). Причем, чем интенсивнее облучение, тем меньше  $t_{ст}$ .

Источником свободных электронов в тригatronах, по-видимому, может служить импульсная корона. Управляющий высоковольтный импульс создает на кромке УЭ высоконапряженное резко неоднородное электрическое поле. Когда амплитуда управляющего импульса достигает потенциала зажигания, на кромке УЭ возникает импульсная корона. Чем меньше радиус скругления кромки УЭ, тем меньше напряжение зажигания короны. Следовательно, чем быстрее нарастает импульс управляющего напряжения и чем острее кромка УЭ, тем меньше время понадобится для рождения первого эффективного электрона в зоне максимальной напряженности поля с кромки УЭ.

В [6, С. 204] описываются начальные явления процесса срабатывания тригatronа. В работе была проведена регистрация предразрядных токов и начальных стадий свечения в разрядном промежутке тригatronа с помощью фотоэлектронных умножителей. Было установлено, что ионизационный процесс у кончика УЭ начинается раньше, чем достигнуто максимальное значение напряжения управляющего импульса. Этот процесс характеризуется быстрым нарастанием предразрядного тока, достигающим десятков ампер, и появлением свечения, которое распространяется от кончика стержня к противоположному ОЭ. Скорость распространения свечения изменялась от 1 мм/нс до 10 мм/нс в зависимости от величины напряжения ГИП – при изменении его от минимального напряжения срабатывания  $U_{мин}$  до статического разрядного напряжения  $U_{пр}$ . Полученная при этом фотография показывает, что развитие разряда в ГИП начинается до пробоя поджигающего промежутка. При этом ГИП заполняется светящимися нитями, направленными по силовым линиям электрического поля. Хотя большинство нитей достигает противоположного электрода, они еще не обладают достаточной проводимостью, чтобы замкнуть промежуток. По своим свойствам они аналогичны стримерам, рождающимся перед головкой лидера в длинных искровых промежутках, получившим название импульсной короны. Поскольку эффективными для образования лавины могут быть фотоэлектроны, возникновение которых возможно в любой точке ГИП, то и стримеры могут развиваться в любой точке разрядного промежутка. При этом направление развития стримеров может быть как в сторону одного, так и в сторону другого ОЭ. Несколько стримеров могут возникнуть

одновременно в разных точках промежутка. Вследствие "ветвистой" природы стримеров (их направления могут отклоняться на  $30 \div 40^\circ$  от направления силовых линий поля) они перекрывают друг друга, образуя разрядный канал между ОЭ – лидер. При напряжениях, близких к  $U_{пр}$ , происходит бурный рост проводимости нитей (стримеров) за счет ударной ионизации, вызванной сильными электрическими полями, и ступенчатой ионизации, что приводит к быстрому формированию разрядного канала в одном из стримеров или в отдельных участках стримеров в случае их пересечения. Дальнейшее развитие разряда в промежутке происходит аналогично пробую в сильно неоднородном поле в результате формирования хорошо проводящего канала лидера.

Очевидно, что чем выше начальная напряженность поля (близкая к разрядной) в ГИП, тем интенсивнее происходят описываемые процессы. Следовательно, выбирая начальную напряженность электрического поля в ГИП, близкую к пробивной, можно уменьшить время развития и формирования разряда, т.е. уменьшить время  $t_3$  и его разброс. Если же напряжение в ГИП существенно ниже  $U_{пр}$ , то проводимость в нитях импульсной короны может уменьшаться во времени в результате того, что процесс прилипания электронов к молекулам кислорода воздуха начинает преобладать над процессами ионизации, что приводит к увеличению  $t_3$ .

Для обеспечения предельно малых времен  $t_3$  и  $\Delta t_3$  в [6, С. 215] рекомендуется использовать тригatronы, у которых длина поджигающего промежутка несколько меньше длины ГИП. При этом управляющий импульс должен иметь амплитуду, примерно равную рабочему напряжению со временем нарастания около 10 нс. Наилучшие достигнутые результаты при давлениях, близких к атмосферному, в воздухе и некоторых других газах составляют  $t_3 \sim 20$  нс,  $\Delta t_3 \sim 5$  нс, что, вероятно, объясняется пониженной рабочей напряженностью в ГИП. Повысить рабочую напряженность можно увеличением давления газа в разрядной камере тригatronа.

В экспериментах [8, 10] в условиях, существенно отличных от рекомендуемых П.И. Шкурпатом, реализуется "потенциальный" механизм инициирования разряда в ГИП до пробоя поджигающего промежутка, причем достигаются также малые времена  $t_3$  и  $\Delta t_3$ . В этих экспериментах длина поджигающего промежутка не превышала 10 – 15% длины ГИП. Кроме того, минимальные времена  $t_3 \sim 5$  нс при минимальном  $\Delta t_3 \sim 0,5$  нс были получены при амплитуде управляющего импульса не более 10 – 15% от величины основного напряжения. Анализ приведенных экспериментальных зависимостей показывает, что для обеспечения наименьших  $t_3$  необходимо, чтобы после прихода управляющего импульса перекрытие основного промежутка происходило быстрее, чем пробьется поджигающий зазор. Для выполнения этого условия в [7, С. 35] рекомендуется правильно соотносить отношение длин основного  $D$  и поджигающего  $d$  промежутков и выбирать оптимальную амплитуду управляющего импульса  $U_{упр}$ . При слишком больших  $U_{упр}$  первым пробивается поджигающий зазор, пусковой

потенциал шунтируется малым импедансом искры в этом зазоре, становится равным потенциалу прилегающего ОЭ, и  $t_3$  увеличивается. При малых  $U_{\text{упр}}$  градиент электрического поля у кромки УЭ уменьшается, и  $t_3$  также возрастает. Рекомендуется выполнять соотношение  $D/d = 5 \div 10$ , т.к. при меньших  $D/d$  уменьшается перенапряжение в зазоре  $d$  при перекрытии промежутка  $D$ , а при больших  $D/d$  необходимо существенно уменьшать  $U_{\text{упр}}$ .

Согласно [10] время  $t_3$  зависит от величины сопротивления в цепи управления. С увеличением сопротивления растут  $t_3$  и  $\Delta t_3$ . Также показано, что вольт – секундные характеристики (зависимости времени  $t_3$  от амплитуды основного напряжения) тригatronа зависят от соотношения полярностей основного и пускового напряжений. В азоте или в его смеси с элегазом наименьшее время  $t_3$  получено при отрицательной полярности основного напряжения и положительной полярности управляющего импульса. Эти выводы подтверждаются и другими авторами [6]. Замечено, что зависимость времени  $t_3$  от амплитуды управляющего импульса  $U_{\text{упр}}$  имеет минимум, т.е. для получения минимального  $t_3$  требуется оптимальное по амплитуде  $U_{\text{упр}}$ . При амплитуде  $U_{\text{упр}}$  больше или меньше оптимального время  $t_3$  увеличивается.

В экспериментах [7, С. 32] выявлено, что вольт – секундные характеристики тригatronа практически не отличаются как при работе с диэлектрической втулкой, так и без нее. Поэтому в практических конструкциях использовались тригatronы без втулки.

В высоковольтных импульсных источниках питания на основе полосковых формирующих линий или малоиндуктивных конденсаторов с плоской ошиновкой в качестве коммутаторов целесообразно использовать искровые разрядники рельсового типа. В неуправляемых рельсовых разрядниках многоканальная коммутация может быть достигнута при скоростях нарастания напряжения на ГИП  $dU/dt \geq 10^{12}$  В/с в условиях резко неоднородного электрического поля. При малых значениях  $dU/dt$  зажигание нескольких разрядных каналов возможно только при управляемом инициировании пробоя. В [11] приводятся результаты испытания газонаполненного (с рабочим давлением до 1 МПа) рельсового разрядника тригatronного типа с локальными узлами поджига. Разрядник рассчитан на коммутацию энергии до 3 кДж при напряжении до 50 кВ. В низковольтном плоском электроде разрядника длиной 50 и шириной 5 см в отверстиях  $\varnothing (7 \div 10)$  мм, расположенных на удалении 5 см друг от друга, установлены стержневые УЭ  $\varnothing 4$  мм. Амплитуда импульса управления  $(10 \div 30)$  кВ, длительность фронта  $\sim 10$  нс. Разрядник заполнялся  $N_2$ , воздухом, или смесью  $N_2 + SF_6$  при давлении  $(0,3 \div 0,8)$  МПа. В экспериментах среднее число разрядных каналов, участвующих в коммутации, не превышало 4 даже при оптимальном сочетании полярностей основного ( $- U_0$ ) и управляющего ( $+ U_{\text{упр}}$ ) напряжений и амплитуде основного напряжения, составляющей  $(0,8 \div 0,9) U_{\text{сп}}$ . Число каналов быстро уменьшалось до одного при снижении уровня  $U_0$ . Следует отметить, что при этом разница времени запаздывания включения отдельных каналов узлов ини-

цирования пробоя в диапазоне  $U_0 = (0,8 \div 0,9) U_{\text{сп}}$  не превышала 2 нс при разбросе времени запаздывания пробоя  $(1,2 \div 1,5)$  нс. Наиболее вероятной причиной невысокой надежности многоканальной работы в этих условиях, по мнению автора, является быстрый (за единицы наносекунд) спад напряжения на ГИП коммутатора после его замыкания первым разрядным каналом, что обусловлено малым значением искровой постоянной для примененной газовой изоляции ГИП [12]. Существенно большие значения искровой постоянной имеют аргон и криптон. При заполнении ими разрядной камеры в смеси с  $N_2$  было получено существенно большее число каналов, участвующих в коммутации.

В исследовании [11] было также отмечено, что при уменьшении внутреннего сопротивления емкостного накопителя надежность многоканальной работы заметно повышается. Автор объясняет это увеличением времени спада напряжения на ГИП, в результате большее число разрядных каналов успевает замкнуть ГИП.

Кроме того, в [11] обнаружено, что при значительном перенапряжении в ГИП, реализуемом после подачи управляющего импульса, часть узлов поджига переключается несколькими разрядными каналами, развивающимися с острой кромки УЭ. Однако это не приводит к заметному улучшению коммутационных характеристик данного разрядника.

В работе [13] проведен расчет электростатического поля модельного тригatronа. При равных потенциалах УЭ и основного электрода с отверстием изменение напряженности поля имеет резко неравномерный характер только вблизи УЭ, выступающего над поверхностью ОЭ на расстоянии от 0 до 2 мм. Неравномерность поля распространяется на расстояние, несколько превышающее диаметр УЭ. Однако распределение поля вдоль центральной силовой линии значительно отличается от картины поля в промежутке "стержень – плоскость". Кроме того, приводится формула для начального напряжения зажигания разряда, позволяющая определить возможность начала ионизационных процессов в месте расположения УЭ еще до подачи управляющего импульса, а, следовательно, оценить вероятность появления свободных электронов в ГИП вследствие протекания процесса ионизации.

Герасимовым А.И. в [14, С. 30] описан тригatron на 100 кВ с модифицированными электродами. ОЭ  $\varnothing 40$  мм размещены на расстоянии 7 мм друг от друга и имеют профилированные поверхности для создания большой области с близким к однородному электрическим полем. УЭ выполнен в виде стержня  $\varnothing 7$  мм. Отверстие ОЭ, в котором размещен УЭ, имеет ступенчатую форму с радиальной длиной зазора 3,5 мм у торца УЭ и ниже – 2 мм. Все острые кромки скруглены по радиусу  $\sim 0,5$  мм. ОЭ без УЭ имеет напротив торца УЭ плоскую часть с кольцевой канавкой (проточкой) глубиной и шириной  $\sim 0,5$  мм. Объем разрядной камеры заполняется смесью 40 %  $SF_6$  и 60 %  $N_2$  при давлении  $(0,5 \div 1)$  МПа. Уширение радиального зазора у торца УЭ несколько нарушает равномерность распределения эквипотенциалей между обоими ОЭ при подаче рабочего напряжения и требует увеличе-

ния на ~ 10% давления газа для сохранения напряжения неуправляемого самопробоя. Но такая геометрия электродов обеспечивает, по мнению автора, следующее. При подаче  $U_{упр}$  распределение электрического поля возмущается в большом объеме газа вплоть до поверхности противостоящего ОЭ, находящегося под отрицательным потенциалом. При этом величина электрического поля достигает  $E_k$  не только на торцевой и боковой (напротив минимального радиального зазора) поверхностях УЭ, но и на поверхности противостоящего ОЭ. Ускоряют пробой могут ионизационные процессы у поверхности кромок кольцевой проточки противостоящего ОЭ, где вследствие усиления поля на микроостриях возникает автоэлектронная эмиссия и взрывы вершин микроострий. Отмечается, что взаимная генерация импульсной подсветкой фотоэлектронов в ГИП и в кольцевом промежутке ускоряет срабатывание тригatronа, увеличивая скорость стримеров в десятки раз. Утверждается, что время  $t_3$  будет минимальным, когда пробой с УЭ на оба ОЭ завершатся одновременно. При этом достигнутые значения времени  $t_3 = 25 \pm 5$  нс.

На наш взгляд проявляется некоторое несоответствие в оценке распределения поля в ГИП в [14, С. 30] и в [13]. В [13] отмечается, что при равенстве потенциалов ОЭ и размещенного в нем УЭ (до подачи управляющего импульса) неравномерность поля распространяется на расстояние, несколько превышающее диаметр УЭ. В [14, С. 30] при уширении радиального зазора у торца УЭ и подаче управляющего импульса электрическое поле возмущается на такое же расстояние (диаметр УЭ и расстояние между ОЭ равны по 7 мм).

В [15] приведено описание компактного многоканального газонаполненного разрядника на 3 МВ авторов С. Мерсера, Я. Смита и Т. Мартина. Хотя авторы описывают его работу с позиций разрядника с искажением поля, однако в нем реализуется механизм инициирования срабатывания такой же как и в тригatronе. К тому же он отличается одной особенностью. Вопреки мнению многих других авторов о том, что меньшие времена  $t_3$  наблюдаются в тригatronах с положительной полярностью УЭ, в этом разряднике он расположен ближе к заземленному ОЭ и находился под высоким отрицательным потенциалом. При этом авторы статьи указывают, что в  $SF_6$ , которым заполнялся разрядник при давлении 1,2 МПа, стримеры распространяются предпочтительнее с положительного, а не отрицательного электрода. Возможно, подразумевается, что УЭ находился под высоким отрицательным потенциалом, который он приобретал до подачи управляющего импульса вследствие того, что его форма повторяла эквипотенциаль вблизи заземленного электрода и полярность противоположного ОЭ была отрицательной, но полярность потенциала УЭ после прихода управляющего импульса была все же положительной. ОЭ были выполнены из нержавеющей стали  $\varnothing 10$  см с расстоянием между ними 7,6 см. УЭ изготовлен в виде диска  $\varnothing 6,5$  см и отстоял от заземленного ОЭ на 5 мм. Корпус выполнен секционированным. При напряжении на разряднике 3 МВ потенциал УЭ составлял 250 кВ. Среднеквадратичный

разброс времени включения разрядника составлял 0,9 нс. В среднем образовывалось 5 – 6 каналов, довольно равномерно распределенных по окружности УЭ.

В некоторых случаях согласно конструктивным или схемным решениям УЭ тригatronа целесообразно размещать в ОЭ, находящемся под высоким потенциалом. Такой тригatron кратко описан в [16]. Тригatron рассчитан на напряжение 2,5 МВ, максимальное давление смеси  $N_2+SF_6$  в нем равно 1,5 МПа, внешней изоляцией служит трансформаторное масло. Управляющие импульсы с длиной фронта 15 нс и максимальной амплитудой до 300 кВ формируются запускающим устройством, расположенным под высоким потенциалом. Заряд запускающего устройства до 200 кВ от источника постоянного напряжения и его запуск осуществляются через развязывающие сопротивления, изоляция которых рассчитана на полное рабочее напряжение. Включение коммутатора осуществляется с точностью не ниже  $\pm 2$  нс. В работе не указывается какую полярность имел ОЭ, в котором размещен УЭ.

В работе [17] мегавольтный коммутатор имеет ОЭ  $\varnothing 300$  мм, выполненные по профилю Брюса из нержавеющей стали, расстояние между ними 35 мм. В высоковольтный электрод встроено 6 тригatronных узлов по окружности 180 мм. УЭ тригatronа расположены по центру отверстий  $\varnothing 12$  мм и выступают над поверхностью основного электрода на 1 мм. Управляющие импульсы имеют фронт 3 нс и амплитуду до 120 кВ. Максимальное давление  $SF_6$  составляло 0,45 МПа. Пробой коммутатора на заземленный корпус имел многоискровой характер (4  $\div$  6 каналов). Хотя в работе приведены осциллограммы импульсов напряжения на коммутаторе отрицательной полярности, остается неясным какую полярность имел ОЭ, в котором размещен УЭ. Кроме того, не приведены величины времен  $t_3$  и  $\Delta t_3$ .

Из зарубежных публикаций, посвященных тригatronам, следует отметить [18]. В ней, в частности, утверждается, что в тригatronах основной вклад в  $t_3$  связан с временем формирования стример – дуга. Предлагаются два возможных механизма ионизации в этот период. Первый – каскадный: ионизация молекул из основного состояния и из возбужденного состояния (после прохождения стримера). Второй – формирование и распространение областей с высокой плотностью ионизации в области с более низкой.

Проведенный анализ литературных источников и выполненные экспериментальные исследования по обеспечению параллельной работы тригatronов, устройство и особенности работы которых опубликованы в [19, 20, 21], позволяют сделать следующее заключение.

Тригatronы с рабочим напряжением до 1 МВ, способные надежно работать в параллель при  $t_3 \approx 1$  нс,  $\Delta t_3 \leq 1$  нс,  $t_k \approx 1$  нс и обладающие высоким ресурсом, должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Рабочее напряжение  $U_p$  между ОЭ должно находиться в диапазоне  $0,85 U_{сп} \leq U_p \leq 0,95 U_{сп}$ , где  $U_{сп}$  – напряжение самопробоя.
2. Скорость нарастания напряжения управляю-

щего импульса должна быть  $dU/dt \geq 10^{13}$  В/с для надежного формирования нескольких разрядных каналов с острой кромки одного УЭ, что улучшает коммутационную характеристику тригatrona. При этом время нарастания управляющего импульса должно быть  $\leq 50$  нс.

3. После прихода управляющего импульса при достижении между УЭ и противостоящим ему ОЭ напряжения, близкого к пробивному, светящаяся зона первоначальной объемной ионизации должна занимать весь разрядный промежуток (между УЭ и противостоящим ему ОЭ). При этом минимальные  $t_3$  и  $\Delta t_3$  получаются, когда УЭ имеет положительную полярность как относительно противостоящего ему, так и относительно охватывающего его ОЭ. Последнее может иметь место как в случае, когда УЭ встроены в низковольтный ОЭ (тогда противостоящий ОЭ находится под высоким потенциалом отрицательной полярности), так и в случае, когда УЭ встроены в высоковольтный электрод положительной полярности.

4. Расстояние между ОЭ (ГИП) должно быть выбрано, исходя из возможности удовлетворения двух условий:

- заполнения всего ГИП зоной первоначальной ионизации между УЭ и противостоящим ему ОЭ после прихода управляющего импульса;

- обеспечения в ГИП напряженности электрического поля, достаточной ( $\geq 4 \times 10^5$  В/см) для уменьшения  $t_3$  и  $\Delta t_3$  вследствие автоэмиссии электронов с микровыступов поверхности катода.

5. На рабочей поверхности ОЭ, противостоящей УЭ, для усиления возмущений электрического поля после прихода управляющего импульса желательна кольцевая канавка с диаметром, соответствующим диаметру рабочей зоны электрода, и с радиусом скругления  $\sim 0,5$  мм.

6. УЭ должен иметь форму цилиндра  $\varnothing (4 \div 8)$  мм, острая кромка торца которого, обращенная к противостоящему ОЭ, должна иметь радиус закругления  $(0,1 \div 0,2)$  мм. УЭ должен выступать вглубь главного искрового промежутка на  $0,1 \div 0,5$  мм.

7. Отношение величины главного искрового промежутка  $D$  к величине поджигающего разрядного промежутка  $d$  между УЭ и прилегающим к нему ОЭ должно находиться в диапазоне  $5 \div 7$ , а  $d$  должно удовлетворять неравенству  $d \leq 2,5$  мм.

8. Для обеспечения ресурса  $10^9$  импульсов и более тригatron должен:

- содержать в разрядной камере защитный металлический экран, находящийся примерно под половинным потенциалом относительно потенциала на высоковольтном ОЭ;

- длина разрядной камеры вдоль внутренней изоляционной поверхности должна, по меньшей мере, в 3 раза превышать длину ГИП (при этом градиент вдоль поверхности не должен превышать  $\sim 100$  кВ/см) для исключения пробоев по внутренней поверхности.

9. Разрядная камера тригatrona для уменьшения  $t_3$  и  $\Delta t_3$  и обеспечения хороших коммутационных характеристик может быть заполнена элегазом SF<sub>6</sub>

или смесью газов с высокой электрической прочностью (например, 10% SF<sub>6</sub> и 90% N<sub>2</sub>) под избыточным давлением  $> 0,5$  МПа. Для технологической установки при прочих равных условиях выбор состава газовой среды может быть осуществлен разрешением компромисса между чистым SF<sub>6</sub> и смесью (10% SF<sub>6</sub> и 90% N<sub>2</sub>). В чистом SF<sub>6</sub> можно обеспечить меньшие разрядные промежутки и давление, но он дороже.

10. Электроды тригatrona должны быть выполнены из стойких к эрозии проводящих материалов, эрозия которых происходит равномерно и медленно (например, из стали Ст3 или сплавов вольфрама, молибдена с медью) или же конструкция электродов должна предусматривать быструю и легкую замену сменных рабочих частей электродов для обеспечения высокого ресурса.

11. Отношение оптимальной амплитуды управляющего импульса  $U_{упр}$  к амплитуде напряжения  $U_p$  между ОЭ тригatrona уменьшается с увеличением  $U_p$  и при  $300 \text{ кВ} \leq U_p \leq 1000 \text{ кВ}$  должно составлять  $0,1 \div 0,3 U_p$ .

12. Расстояние между соседними тригatronами при их параллельной работе должно превышать величину  $S = k v (\Delta t_3 + \Delta t_k)$ , где  $k > 1$  – безразмерный коэффициент запаса;  $v$  – скорость распространения электромагнитной волны в среде между тригatronами.

Упрощенное изображение электродной системы тригatrona, удовлетворяющего вышеперечисленным требованиям, приведено на рис. 2, где 1,2 – ОЭ; 3 – УЭ; 4 – защитный экран; 5 – корпус тригatrona;  $D < 2a$ , а – кратчайшее расстояние между ОЭ и защитным экраном.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ технической литературы позволяет выделить два основных механизма иницирования пробоя тригatrona: "медленный" и "быстрый" механизмы. При "медленном" (наблюдается  $t_3 \sim 1$  мкс и более;  $\Delta t_3 \sim 0,1$  мкс и более) пробой иницируется действием поджигающей искры в промежутке между УЭ и прилегающим ОЭ. При "быстром" механизме (существенно меньшие  $t_3 \leq 20$  нс;  $\Delta t_3 \leq 5$  нс) иницирование пробоя вызвано действием сильного резконеоднородного электрического поля вблизи конца УЭ. При "медленном" механизме первым пробивается поджигающий промежуток, а при "быстром" – первым пробивается промежуток между УЭ и противостоящим ему ОЭ.

2. Пробой тригatrona по "быстрому" механизму осуществляется в два этапа. Первый – стример (или несколько стримеров) формируется в области усиленного поля вблизи конца УЭ (или занимая более значительную часть ГИП, в предельном случае весь ГИП по длине – от конца УЭ до противостоящего ОЭ) и распространяется через весь ГИП. Второй – интенсивность ионизации в образовавшемся (-шихся) канале (-лах) под действием поля увеличивается, пока не сформируется хорошо проводящий искровой канал (-лы), пробивается поджигающий промежуток, и тригatron замыкается искрой (искрами).

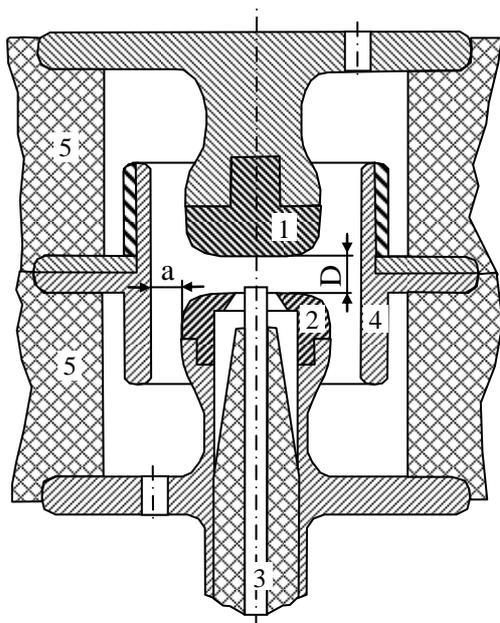


Рис. 2

3. Несмотря на более чем полувековой период разработки и исследования тригatronов остаются до сих пор не вполне понятными отдельные стадии процессов, происходящих в них. В частности, требуют дальнейших исследований процессы, связанные с формированием искрового канала (каналов) в тригatronе и занимающие по времени значительную часть  $t_s$ .

4. Выработаны требования к тригatronам с высоким ресурсом, параллельная работа которых может обеспечить коммутацию мощностей порядка 1 ТВт и более.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стекольников И.С. Молния. М., изд-во АН СССР, 1943.
2. Lampe W. ETZ-A, 83H, 18, 591 (1962).
3. Sletten A.M., Lewis T.J. Proc. Inst. Electr. Engrs, Pt.C, 104, No. 5, 54 (1957).
4. Saxe R.F. Proc. Of the 5-th Intern. Conf. on Ioniz. Phenomena in Gases, V. 1, Amsterdam, 1962.
5. Шкуропат П.И. Ж. техн. физ., 30, 954 (1960).
- 6]. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шнейерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
7. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. – Новосибирск: Наука, 1979, 175 с.
8. Ельчанинов А.С., Емельянов В.Г., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Поталицын Ю.Ф. Многоискровая работа мегавольтного тригatronа // Приборы и техника эксперимента. – 1974. - № 2. – С. 103 – 105.
9. Ковальчук Б.М., Лавринович В.А., Подковыров В.Г., Поталицын Ю.Ф. О механизме наносекундного режима работы мегавольтных тригatronов. – В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по сильноточной импульсной электронике. Томск, Ин – т сильноточной электроники, 1978. – С. 143 – 144.
10. Емельянов В.Г., Ковальчук Б.М., Лавринович В.А., Месяц Г.А., Поталицын Ю.Ф. Многоискровой высоковольтный тригatron // Приборы и техника эксперимента. – 1975 - № 4 – С. 89 – 92.

11. Капишников Н.К. Высоковольтный рельсовый разрядник тригatronного типа // Приборы и техника эксперимента. – 1989. - № 2. – С. 127 – 133.
12. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Сов. Радио, 1974. – 255 с.
13. Елисеева Н.Н., Никифоров М.Г. К расчету начальных напряжений тригatronа, наполненного SF<sub>6</sub>– Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы. Тезисы докладов совместного заседания секций научных советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики". Томск, 27 – 28 ноября 1986 г. – С. 13 – 15.
14. Герасимов А.И. Многоканальные разрядники с ламельными управляющими электродами, их развитие и применение // Приборы и техника эксперимента. – 2004. - №1. – С. 5 – 38.
15. Накопление и коммутация энергии больших плотностей. Под ред. У. Бостика, В. Нарди, О. Цукера. Пер. с англ. Под ред. д-ров техн. наук Э.И. Асиновского и В.С. Комелькова. – М.: Мир, 1979. – С. 414 – 420.
16. Евлампиев С.Б., Коршунов Г.С. Управляемый газонаполненный коммутатор на 5 МВ. – Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы. Тезисы докладов совместного заседания секций научных советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики". Томск, 27 – 28 ноября 1986 г. – С. 29.
17. Валеев Р.И., Давыдов О.В., Никифоров М.Г., Харченко А.Ф., Чумаков А.А. Многоканальный мегавольтный коммутатор с поджигом на высоком потенциале. – Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы. Тезисы докладов совместного заседания секций научных советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики". Томск, 27 – 28 ноября 1986 г. – С. 77 – 78.
18. Buttram M.T., Sampayan S. Repetitive Spark Gap Switches / Gas Discharge Closing Switches / Ed. By G. Schaefer, M. Kristiansen, and A. Guenther. N.Y.: Plenum press, 1990. P. 63 – 85.
19. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Четырехканальный высоковольтный искровой разрядник // Электротехника і Електромеханіка. – Харьков: НТУ "ХПИ".-2006. - №3. – С. 80-81.
20. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М., Артюх В.Г. Тригatronы на 400 кВ для мощных низкоиндуктивных генераторов импульсов // ПТЭ, 2008, №1, С. 78 – 86.
21. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Тригatronы на рабочее напряжение до 1 МВ с наносекундным временем срабатывания // Технічна електродинаміка. – 2009. - № 1. – С. 38 – 43.

Поступила 18.05.2009

*Бойко Николай Иванович, д.т.н.,  
Евдошенко Леонид Свиридович,  
Зароченцев Александр Иванович,  
Иванов Владимир Михайлович,  
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт",  
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47.  
e-mail: eft@kpi.kharkov.ua, тел. (057) 7076183.*

## ПРИБЛИЖЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПРОВОДИМОСТИ СИСТЕМЫ ТОНКИЙ СОЛЕНОИД – ВНЕШНЯЯ ПРОВОДЯЩАЯ ОБОЛОЧКА

Отримано формулу для визначення імпульсної провідності системи в наближенні рівномірного розподілу вихрових струмів по товщині оболонки. Зроблено оцінку похибок наближення на основі аналізу та розрахунків.

Получена формула для определения импульсной проводимости системы в приближении равномерного распределения вихревых токов по толщине оболочки. Сделана оценка погрешностей приближения на основе анализа и расчетов.

### ВВЕДЕНИЕ

В электротехнике, например, при электромагнитном экранировании или в магнитно-импульсной обработке металлов [1], используют длинные тонкие цилиндрические проводящие оболочки, внутри которых расположен соосный соленоид (рис. 1). При проектировании таких систем возникает необходимость установления связи между током  $i(t)$ , протекающим через соленоид, и падением напряжения на нём  $u(t)$ . В случае тонкого соленоида представляем падение напряжения в таком виде [2]:

$$u(t) = u_r(t) + u_\phi(t), \quad (1)$$

где  $u_r(t)$  и  $u_\phi(t)$  – падения напряжения, обусловленные соответственно омическими потерями в соленоиде и магнитным полем в непроводящих областях и проникновением электромагнитного поля в оболочку.

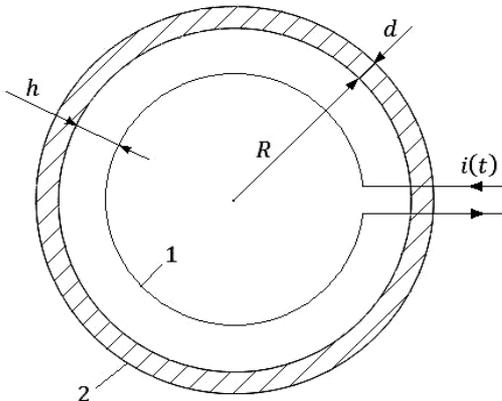


Рис. 1. Расчётная конструкция системы соленоид – внешняя оболочка: 1 – соленоид, 2 – оболочка

В отсутствие поверхностного эффекта первое слагаемое (1) выражается при помощи закона Ома через омическое сопротивление соленоида  $r_s$ . Для нахождения второго слагаемого (1) используем операторную проводимость системы без учёта потерь в соленоиде  $Y_\phi(p)$ . Тогда изображения по Лапласу тока и второго слагаемого (1) согласно закону Ома связаны таким соотношением:

$$I(p) = Y_\phi(p)U_\phi(p). \quad (2)$$

Закону Ома в операторной форме (2) при известном токе соответствует во временной области интегральное уравнение Вольтерра 1-го рода [3]

$$\int_0^t u_\phi(\tau) y_\phi(t - \tau) d\tau = i(t), \quad (3)$$

где  $y_\phi(t)$  – импульсная проводимость, являющаяся оригиналом операторной проводимости  $Y_\phi(p)$ .

Из (3) видно, что импульсная проводимость  $y_\phi(t)$ , являясь ядром интегрального уравнения, играет исключительную роль при анализе переходного процесса в цепи источника и системы соленоид – внешняя оболочка.

Для дальнейшего анализа примем следующие основные допущения: соблюдаются условия квазистационарности; магнитное поле в зазоре между соленоидом и оболочкой и внутри соленоида однородно; волна электромагнитного поля в стенке оболочки является плоской; оболочка неподвижна и имеет постоянные удельную электропроводность  $\gamma$  и абсолютную магнитную проницаемость  $\mu$ . Толщина оболочки  $d \ll R$  ( $R$  – внутренний радиус, рис. 1), длина –  $b$ , равная длине соленоида. Соленоид имеет  $w$  витков из относительно тонкого провода. Известная формула для расчёта импульсной проводимости такой системы имеет вид [2]

$$y_\phi(t) = \frac{1}{L_0} \left[ 1 + 2 \frac{S_0}{S_h} \sum_{k=1}^{k=\infty} a_k \exp\left(-\frac{y_k^2}{d^2 \mu \gamma} t\right) \right], \quad (4)$$

где  $L_0$  – внешняя индуктивность уединённого соленоида,

$$L_0 = \mu_0 w^2 S_0 / b,$$

$S_0$  и  $S_h$  – площади поперечного сечения отверстия соленоида и зазора между соленоидом и оболочкой;  $y_k$  – корни трансцендентного уравнения

$$y_k \operatorname{tg} y_k = C_h; \quad (5)$$

$$C_h = 2\mu_r \frac{d}{R} \left( 1 + \frac{S_0}{S_h} \right),$$

$\mu_r = \mu / \mu_0$ ,  $\mu_0$  – магнитная постоянная;

$$a_k = (1 + C_h + C_h^{-1} y_k^2)^{-1}. \quad (6)$$

В основе формулы (4) лежит точная переходная функция напряжённости магнитного поля внутри соленоида [4], поэтому в рамках принятых допущений она является точной. Расчёты показывают, что в случае тонких оболочек ряд быстро сходится всюду, за исключением небольшого промежутка времени в начале процесса, и для обеспечения требуемой точности достаточно ограничиться первым его членом. Однако применение этой формулы затрудняется необходимостью решения трансцендентного уравнения (5).

## ПЕРВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Согласно методике [2] изображение по Лапласу падения напряжения  $u_{\phi}(t)$  представляем в таком виде:

$$U_{\phi}(p) = p w \mu_0 S_0 H_0(p), \quad (7)$$

где  $H_0(p)$  – изображение по Лапласу напряжённости магнитного поля в отверстии соленоида.

В отличие от формулы (4) для нахождения  $H_0(p)$  используем переходную функцию напряжённости магнитного поля в отверстии соленоида первого приближения, для которого  $\mu_r \frac{d}{R} \ll 1$  [4]. Изображение по Лапласу

$$H_0(p) = \frac{I(p)w}{b} \left[ 1 - \frac{S_0}{S_0 + S_h} \cdot \frac{p}{p + 1/\tau^{(1)}} \right]$$

подставляем в (7) и вначале находим операторную проводимость первого приближения

$$Y_{\phi}^{(1)}(p) = \frac{1}{L_0} \left( 1 + \frac{S_0}{S_h} \right) \frac{p + \frac{1}{\tau^{(1)}}}{p \left[ p + \frac{1}{\tau^{(1)}} \left( 1 + \frac{S_0}{S_h} \right) \right]}, \quad (8)$$

а затем – искомую импульсную проводимость первого приближения

$$y_{\phi}^{(1)}(t) = \frac{1}{L_0} \left[ 1 + \frac{S_0}{S_h} \exp\left(-\left(1 + \frac{S_0}{S_h}\right) \frac{t}{\tau^{(1)}}\right) \right], \quad (9)$$

где  $\tau^{(1)}$  – постоянная времени первого приближения,

$$\tau^{(1)} = \mu_0 \gamma d R / 2.$$

Сравнивая (4) и (9), прежде всего отметим, что предельные значения функций  $y_{\phi}(t)$  и  $y_{\phi}^{(1)}(t)$  при  $t=0$  и  $t \rightarrow \infty$  (учтено ранее полученное тождество  $\sum_{k=1}^{\infty} a_k = 1/2$  [2]) одинаковы. Для более детального сравнения, учитывая быструю сходимость, ограничимся первым членом ряда в формуле (4). Получим:

$$y_{\phi}(t) \Big|_1 = \frac{1}{L_0} \left[ 1 + 2 \frac{S_0}{S_h} a_1 \exp\left(-\frac{y_1^2}{d^2 \mu \gamma} t\right) \right]. \quad (10)$$

Сопоставляя формулы (9) и (10), видим, что они тождественны при выполнении двух условий:

$$y_1 / (d^2 \mu \gamma) = \left( 1 + \frac{S_0}{S_h} \right) / \tau^{(1)}; \quad (11)$$

$$a_1 = 1/2. \quad (12)$$

Если в уравнении (5) принять  $\operatorname{tg} y_1 \approx y_1$ , то получаем первое приближение первого корня

$$y_1^{(1)} \approx \sqrt{2 \mu_r \frac{d}{R} \left( 1 + \frac{S_0}{S_h} \right)}. \quad (13)$$

Нетрудно убедиться, что условие (11) удовлетворяется, если в нём принять  $y_1 = y_1^{(1)}$ . В табл. 1 сделано сравнение  $y_1$  и  $y_1^{(1)}$  при  $\mu_r = 1$  и различных значениях  $d/R$  и  $h/R$  ( $h$  – ширина непроводящего зазора между соленоидом и оболочкой, рис. 1).

Из табл. 1 следует, что погрешность первого приближения  $y_1$  минимальна при  $d/R = 0,025$  и  $h/R = 0,293$  (~1,7%) и максимальна при  $d/R = 0,1$  и  $h/R = 0,05$  (~32%). Она возрастает с увеличением  $d/R$  и уменьшением  $h/R$  соответственно из-за увеличения и усиления влияния неравномерности распределения тока по толщине оболочки.

Таблица 1  
Точные (в числителях) и первого приближения (в знаменателях) значения первого корня трансцендентного уравнения (5)

$d/R$	$h/R$			
	0,05	0,1	0,2	0,293
0,025	$\frac{0,66032}{0,71611}$	$\frac{0,49154}{0,51299}$	$\frac{0,36427}{0,37268}$	$\frac{0,31105}{0,31623}$
	$\frac{0,86829}{1,01274}$	$\frac{0,66761}{0,72548}$	$\frac{0,50385}{0,52705}$	$\frac{0,43284}{0,44721}$
0,1	$\frac{1,08447}{1,43223}$	$\frac{0,87647}{1,02598}$	$\frac{0,68292}{0,74536}$	$\frac{0,59324}{0,63246}$

В табл. 2 приведены значения  $a_1$ , рассчитанные по формуле (6) при  $\mu_r = 1$  и различных отношениях  $d/R$  и  $h/R$ . Видим, что тенденции изменения отклонения  $a_1$  от  $1/2$  согласно условию (12) такие же, как и погрешности первого приближения  $y_1$ : это отклонение возрастает с увеличением  $d/R$  и уменьшением  $h/R$ , достигая очень больших величин (при  $d/R = 0,1$  и  $h/R = 0,05$  – ~45%).

Таблица 2  
Значения  $a_1$  (в числителях) и их отклонения от  $1/2$  в процентах (в знаменателях)

$d/R$	$h/R$			
	0,05	0,1	0,2	0,293
0,025	$\frac{0,42318}{15,4}$	$\frac{0,45844}{8,3}$	$\frac{0,47750}{4,5}$	$\frac{0,48367}{3,3}$
	$\frac{0,36222}{27,6}$	$\frac{0,42138}{15,7}$	$\frac{0,45627}{8,7}$	$\frac{0,46800}{6,4}$
0,1	$\frac{0,27589}{44,8}$	$\frac{0,35940}{28,1}$	$\frac{0,41753}{16,5}$	$\frac{0,43863}{12,3}$

В табл. 3 сделано сравнение точных и первого приближения безразмерных значений импульсной проводимости системы соленоид – внешняя оболочка в различные моменты времени при  $\mu_r = 1$ . Используются следующие безразмерные и базисные величины:  $y_{\phi}^* = y_{\phi} / y_{\phi 0}$ ;  $y_{\phi}^{(1)*} = y_{\phi}^{(1)} / y_{\phi 0}$ ;  $t^* = t / t_{\phi 0}$ ;  $y_{\phi 0} = [L_0 (1 + \frac{S_h}{S_0})]^{-1}$ ;  $t_{\phi 0} = R^2 \mu_0 \gamma$ .

Для контроля сходимости расчёты по точной формуле (4) выполняли при числе членов ряда  $n=1, 5, 10$ . При  $d/R = 0,025, 0,05$  и  $t^* \geq 0,001$  достаточно было ограничиться  $n=1$ , а при  $d/R = 0,1$  – несколькими членами ряда.

Для  $h/R = 1 - 1/\sqrt{2} \approx 0,293$  при  $t=0$  напряженности магнитного поля в зазоре и в отверстии соленоида равны по модулю [5], а величина  $y_{\phi}^*(0) = 4$  – минимальна [2].

Таблица 3

Точные ( $y_{\Phi}^*(t^*)$ ) и первого приближения ( $y_{\Phi}^{(1)*}(t^*)$ ) значения импульсной проводимости

$h/R$	$t^*$	$d/R = 0,025$		$d/R = 0,05$	
		$y_{\Phi}^*(t^*)$	$y_{\Phi}^{(1)*}(t^*)$	$y_{\Phi}^*(t^*)$	$y_{\Phi}^{(1)*}(t^*)$
0,05	0	11,3644	11,3644	11,3644	11,3644
	0,001	5,4289	5,6230	6,6175	7,9130
	0,002	3,2588	3,0955	5,1732	5,6230
	0,003	2,1786	1,9830	4,1147	4,1036
	0,004	1,6409	1,4932	3,3320	3,0955
	0,005	1,3733	1,2776	2,7530	2,4267
	0,010	1,1161	1,1108	1,4722	1,2776
	0,020	1,1080	1,1080	1,1259	1,1108
0,293	0	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
	0,001	3,6572	3,7043	3,7381	3,8462
	0,002	3,4195	3,4523	3,6115	3,7043
	0,003	3,2159	3,2376	3,4951	3,5733
	0,004	3,0416	3,0546	3,3871	3,4523
	0,005	2,8922	2,8987	3,2870	3,3406
	0,010	2,4114	2,4038	2,8848	2,8987
	0,020	2,0875	2,0815	2,4182	2,4038

Представляем операторную проводимость  $Y_{\Phi}^{(1)}(p)$ , выраженную формулой (8), в виде суммы простых дробей [6]. Получим:

$$Y_{\Phi}^{(1)}(p) = \frac{1}{pL_0} + \frac{1}{pL_h + r^{(1)}}, \quad (14)$$

где  $L_h = \mu_0 S_h w^2 / b$ ;  $r^{(1)} = \frac{2\pi R}{\gamma db} w^2$ .

Формулам (1) и (14) соответствует схема замещения, показанная на рис. 2.

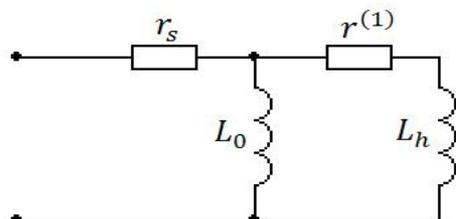


Рис. 2. Схема замещения первого приближения системы соленоид – внешняя оболочка

Точная схема замещения системы соленоид – внешняя оболочка состоит из бесконечного числа параллельных звеньев [2], причем первое звено такое же, как и в схеме первого приближения (см. рис.2), а параметры остальных равны

$$L_k = \frac{1}{2a_k} L_0 \frac{S_h}{S_0}, \quad (15)$$

$$r_k = L_k \frac{y_k^2}{d^2 \mu \gamma}, \quad (16)$$

$$k = 1, 2, \dots$$

Принимая в формулах (15), (16)  $k = 1$ , а также используя условия (11), (12), получаем  $L_1 \approx L_h$ ,  $r_1 \approx r^{(1)}$ . Заметим, что схема первого приближения имеет только два параллельных звена, а величина  $r^{(1)}$  равна

электрическому сопротивлению оболочки постоянно-му току, умноженному на квадрат числа витков соленоида.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Первое приближение импульсной проводимости системы тонкий соленоид – внешняя проводящая оболочка  $y_{\Phi}^{(1)*}(t^*)$ , основанное на допущении равномерного распределения вихревых токов в оболочке, имеет точные предельные значения при  $t=0$  и  $t \rightarrow \infty$ .

2. В начале переходного процесса ( $t^* \leq 0,005$ ) значения  $y_{\Phi}^{(1)*}(t^*)$  имеют максимальные погрешности из-за фактического неравномерного распределения вихревых токов. Они уменьшаются с увеличением  $h/R$  и в случае очень тонких оболочек ( $d/R = 0,025$ ) составляют несколько процентов, а при  $d/R = 0,05$  и  $h/R = 0,05$  достигают ~20% (табл. 3). То же относится и к схеме замещения первого приближения.

3. Влияние рассматриваемых погрешностей первого приближения на точность расчетов переходных процессов может быть существенно меньше, поскольку оно зависит также от параметров остальных элементов контура.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков : изд. объед. "Вища школа", 1977. – 168 с.
- Михайлов В.М. Импульсная проводимость системы соленоид – внешняя оболочка // Электронное моделирование. – 2000. – Т.22, №3. – С. 73-84.
- Краснов М.Л. Интегральные уравнения. (Введение в теорию). – М.: "Наука", 1975. – 304 с.
- Витков М.Г. Импульсное возбуждение магнитного поля внутри цилиндрического экрана // Журнал технической физики. – 1965. – №10. – С. 1786-1790.
- Новгородцев А.Б., Шнеерсон Г.А. Переходные процессы и электродинамические усилия в системе соленоид – замкнутый экран // Тр. Ленингр. политехн. ин-та. – 1966. – № 273. – С. 139-151.
- Конторович М. И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. – М.: "Сов. Радио", 1975. – 320 с.

Поступила 20.06.2009

Бондина Нина Николаевна, к.т.н., доц.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",  
кафедра "Вычислительная техника и программирование",  
тел. (057) 707-60-19

Михайлов Валерий Михайлович, д.т.н., проф.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",  
кафедра "Инженерная электрофизика",  
тел. (057) 707-60-52

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С МАССИВНЫМ ЭКРАНОМ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

*Стаття присвячена розрахункам основних характеристик індукційної індукторної системи з одновитковим соленоїдом, масивним екраном кінцевої товщини і неферомагнітною листовою заготовкою. У наближенні достатньої тонкості оброблюваного об'єкту одержані аналітичні залежності для розрахунку напруженості електричної і магнітної складової електромагнітних полів в даній індукторній системі*

*Статья посвящена расчётам основных характеристик индукционной индукторной системы с одновитковым соленоидом, массивным экраном конечной толщины и неферромагнитной листовой заготовкой. В приближении достаточной тонкостенности обрабатываемого объекта получены аналитические зависимости для расчёта напряжённостей электрической и магнитной составляющей электромагнитных полей в рассматриваемой индукторной системе.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Исследования индукционной системы как с внешним вспомогательным экраном, так и с экраном в плоскости внутреннего отверстия витка индуктора, показали довольно низкую эффективность данной конструкции инструмента [1 – 4].

Априорные физические соображения приводят к выводу о целесообразности использования достаточно массивного проводящего вспомогательного экрана. Максимум адекватности расчётов и реальных в практическом исполнении индукционных индукторных систем имеет место, если массивный экран обладает конечной толщиной. Его массивность в сравнении с обрабатываемой листовой заготовкой способствует росту механической прочности системы в целом. Кроме того, дополнительным положительным качеством такой конструкции системы является увеличение эффективности тепло отвода из её рабочей зоны.

#### Анализ основных достижений и публикаций.

Известны различные технические решения по осуществлению операции внешней рихтовки самолётных корпусов. Наиболее практичными из них являются предложения инженеров концерна "Boeing" и фирм "Electroimpact", "Fluxtronic" [2, 5], основанных на использовании энергии импульсных магнитных полей.

В ряде работ бывших советских учёных обсуждался вопрос о возможности достижения эффекта притяжения с помощью одного индуктора, в обмотке которого протекают два токовых импульса с разной частотой. С физической точки зрения принцип действия всех этих предложений одинаков. Он основан на суперпозиции низкочастотного и высокочастотного магнитных полей, возбуждаемых в индукторной системе. Идентичным также является технический уровень сложности по практическому воплощению в жизнь этих идей [1].

Предложения учёных США требуют наличия двух источников мощности, достаточно сложных схем управления, систем высоковольтной электроники и т.д. Предложения бывших советских учёных также весьма сложны для практики, так как требуют создания особых систем коммутации сильных токов в их максимуме. Все эти факторы обуславливают высокую стоимость, низкую надёжность вышеперечисленных устройств по магнитно-импульсному притяже-

нию листовых металлов и существенно снижают их практическую значимость.

Первые конструкции индукционных инструментов притяжения содержали тонкостенный экран и листовую заготовку [2, 4, 6]. Но, как следует из априорных физических соображений, повышение эффективности систем такого рода возможно при использовании массивного проводящего вспомогательного экрана. Расчёту основных характеристик в приближении экрана бесконечной толщины посвящена работа [1].

**Цель настоящей работы** – получение аналитических зависимостей для расчета электромагнитных процессов в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном конечной толщины и тонкостенной листовой заготовкой.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Практическая работоспособность предлагаемой индукторной системы, так же как и в предыдущих конструкциях, определяется собственно её геометрией, электрофизическими, геометрическими характеристиками экрана и заготовки, а также амплитудно-временными параметрами токового импульса в их взаимосвязи.

Расчётная модель в цилиндрической системе координат, принятая для анализа электромагнитных процессов, показана на рис. 1.

Решение проводится аналогично предыдущим рассматриваемым [1, 3 – 5].

При решении задачи примем следующие допущения.

- Массивный экран конечной толщины  $d_1$  выполнен из металла с электропроводностью  $\gamma_1$ , тонкостенная листовая заготовка толщиной  $d_2$  из металла с электропроводностью  $\gamma_2$ , расстояние между ними –  $h$ , поперечные размеры достаточно велики. Металлы не обладают магнитными свойствами.
- Цилиндрический виток индуктора – 3 с внутренним радиусом –  $R_1$ , внешним –  $R_2$ , толщиной –  $g$  изолирован и располагается в пазах внутренней поверхности экрана со стороны листовой заготовки. Собственно металл витка не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы.

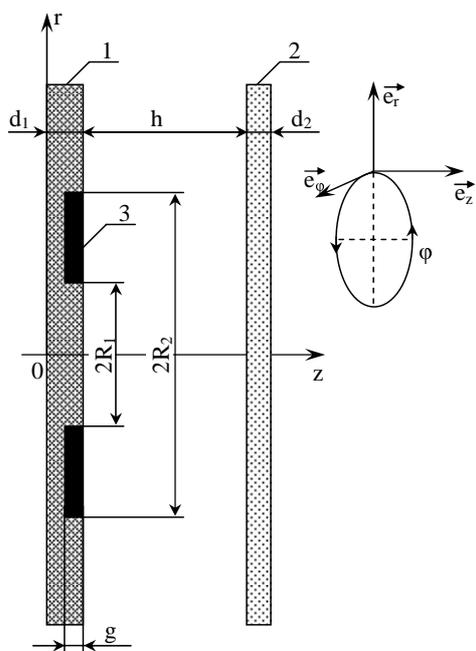


Рис. 1. Расчётная модель системы, 1 – вспомогательный экран, 2 – обрабатываемая листовая заготовка, 3 – одновитковый соленоид-индуктор  $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$ , – направляющие орты цилиндрической системы координат

• Амплитудно-временные параметры тока индуктора  $I(t)$  таковы, что справедливо квазистационарное приближение по Ландау:  $\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1$ ,  $\omega$  – круговая частота,  $c$  – скорость света в вакууме,  $l$  – характерный размер системы.

• Имеет место аксиальная симметрия, так что  $\frac{\partial}{\partial \phi} = 0$ , ( $\phi$  – азимутальный угол).

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

$$\left[ \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} \right] = j_\phi(p, r, z); \quad (1)$$

$$\left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\phi(p, r, z)) \right] = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \quad (2)$$

$$\left[ \frac{\partial E_\phi(p, r, z)}{\partial z} \right] = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z); \quad (3)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;

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

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

$$j_\phi(p, r, z) = L\{j_\phi(t, r, z)\}; \mu_0 – \text{магнитная проницаемость вакуума.}$$

В общем случае плотность тока в правой части уравнения (1) записывается в виде:

$$j_\phi(p, r, z) = (p \cdot \epsilon_0 + \gamma) \cdot E_\phi(p, r, z) + j_{\phi i}(p, r, z), \quad (4)$$

где  $j_{\phi i}(p, r, z)$  – плотность стороннего тока в индукторе,  $j_{\phi i}(p, r, z) = j(p) \cdot f(r) \cdot \eta(z - (d_1 - g))$ ,

$$j(p) = \frac{I(p)}{(R_2 - R_1) \cdot g}; \quad f(r) – \text{функция радиального}$$

распределения тока в витке индуктора;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

При решении поставленной задачи в принятой модели расчёта следует выделить области с однородными электрофизическими характеристиками:

- свободное полупространство с внешней стороны вспомогательного экрана,  $z \in (-\infty, 0]$ ;
- металл вспомогательного экрана,  $z \in [0, d_1]$ ;
- пространство между экраном и листовой заготовкой,  $z \in [d_1, (d_1 + h)]$ ;
- металл листовой заготовки,  $z \in [(d_1 + h), ((d_1 + h) + d_2)]$ ;
- свободное полупространство с внешней стороны листовой заготовки,  $z \in [((d_1 + h) + d_2), \infty]$ .

Из дифференциальных уравнений (1 – 3) с учётом выражения (4) в рамках принятых допущений получим уравнения для азимутальной компоненты напряжённости электрического поля  $E_\phi(p, r, z)$  в выделенных областях.

В полупространстве с внешней стороны экрана,  $z \in (-\infty, 0]$ , получаем, что

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

В металле вспомогательного экрана,  $z \in [0, d_1]$ :

$$\frac{\partial^2 E_\phi^{(2)}(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\phi^{(2)}(p, r, z)) \right) - (p\gamma_1 \mu_0) E_\phi^{(2)}(p, r, z) = p\mu_0 j_{\phi i}(p, r, z). \quad (6)$$

В пространстве, где  $z \in [d_1, (d_1 + h)]$ :

$$\frac{\partial^2 E_\phi^{(3)}(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\phi^{(3)}(p, r, z)) \right) = 0. \quad (7)$$

В пространстве, где  $z \in [(d_1 + h), ((d_1 + h) + d_2)]$ :

$$\frac{\partial^2 E_\phi^{(4)}(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\phi^{(4)}(p, r, z)) \right) - (p\gamma_2 \mu_0) E_\phi^{(4)}(p, r, z) = 0. \quad (8)$$

В пространстве, где  $z \in [((d_1 + h) + d_2), \infty]$ :

$$\frac{\partial^2 E_\phi^{(5)}(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\phi^{(5)}(p, r, z)) \right) = 0. \quad (9)$$

Условию ограниченности радиального распределения  $E_\phi(p, r, z)$  из уравнений (5 – 9) при  $r = 0$  и  $r = \infty$  удовлетворяет интегральное преобразование Фурье-Бесселя [6]:

$$E_\phi(p, r, z) = \int_0^\infty E_\phi(p, \lambda, z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot \lambda \cdot d\lambda, \quad (10)$$

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

В соответствии с (10) уравнения (5 – 9) приводятся к обыкновенным линейным дифференциальным уравнениям второго порядка с постоянными коэффициентами:

- в полупространстве вне экрана,  $z \in (-\infty, 0]$ ,

$$\frac{d^2 E_{\Phi}^{(1)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\Phi}^{(1)}(p, \lambda, z) = 0. \quad (11)$$

б) в пространстве, где,  $z \in [0, d_1]$ :

$$\frac{d^2 E_{\Phi}^{(2)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - q_1^2(p, \lambda) \cdot E_{\Phi}^{(2)}(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \cdot \eta(z - (d_1 - g)), \quad (12)$$

где  $q_1(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p \cdot \mu_0 \cdot \gamma_1}$  – волновое число в металле с удельной электропроводностью  $\gamma_1$ ,

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

в) в пространстве, где,  $z \in [d_1, (d_1 + h)]$ ,

$$\frac{d^2 E_{\Phi}^{(3)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\Phi}^{(3)}(p, \lambda, z) = 0, \quad (13)$$

г) в пространстве, где,  $z \in [(d_1 + h), ((d_1 + h) + d_2)]$ ,

$$\frac{d^2 E_{\Phi}^{(4)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - q_2^2(p, \lambda) \cdot E_{\Phi}^{(4)}(p, \lambda, z) = 0, \quad (14)$$

где  $q_2(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p \cdot \mu_0 \cdot \gamma_2}$  – волновое число в металле с удельной электропроводностью  $\gamma_2$ ,

д) в свободном полупространстве с внешней стороны металлического листа,  $z \in [((d_1 + h) + d_2), \infty]$ ,

$$\frac{d^2 E_{\Phi}^{(5)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\Phi}^{(5)}(p, \lambda, z) = 0. \quad (15)$$

Общие интегралы уравнений (11 – 15) в выделенных областях дают выражения для напряжённости электрического поля. Уравнение Максвелла (3) позволяет получить соответствующие формулы для тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля в выделенных областях принятой расчётной модели.

Итак,

а) в полупространстве вне экрана,  $z \in (-\infty, 0]$ , уравнениям (11) и (3), а также условию ограниченности  $z \rightarrow -\infty$ , удовлетворяют функции:

$$E_{\Phi}^{(1)}(p, \lambda, z) = B(p, \lambda) \cdot e^{\lambda z}, \quad (16)$$

$$H_r^{(1)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p \cdot \mu_0} B(p, \lambda) \cdot e^{\lambda \cdot z}, \quad (17)$$

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

б) в пространстве, где,  $z \in [0, d_1]$ ,

$$E_{\Phi}^{(2)}(p, \lambda, z) = C_1(p, \lambda) \cdot e^{q_1(p, \lambda) \cdot z} + C_2(p, \lambda) \cdot e^{-q_1(p, \lambda) \cdot z} + \frac{K(p, \lambda)}{q_1^2(p, \lambda)} \eta(z - (d_1 - g)) \cdot \text{ch}(q_1(p, \lambda)(z - (d_1 - g))) - 1, \quad (18)$$

$$H_r^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{q_1(p, \lambda)}{p \cdot \mu_0} [C_1(p, \lambda) \cdot e^{q_1(p, \lambda) \cdot z} - C_2(p, \lambda) \times e^{-q_1(p, \lambda) \cdot z} + \frac{K(p, \lambda)}{q_1^2(p, \lambda)} \eta(z - (d_1 - g)) \times$$

$$\times \text{sh}(q_1(p, \lambda)(z - (d_1 - g)))]$$

где  $C_{1,2}(p, \lambda)$  – произвольные постоянные интегрирования,

в) в пространстве между экраном и листовой заготовкой,  $z \in [d_1, (d_1 + h)]$ ,

$$E_{\Phi}^{(3)}(p, \lambda, z) = D_1(p, \lambda) e^{\lambda \cdot (z - d_1)} + D_2(p, \lambda) e^{-\lambda \cdot (z - d_1)}, \quad (20)$$

$$H_r^{(3)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p \mu_0} [D_1(p, \lambda) e^{\lambda(z - d_1)} - D_2(p, \lambda) e^{-\lambda(z - d_1)}], \quad (21)$$

где  $D_{1,2}(p, \lambda)$  – произвольные постоянные интегрирования,

г) в области металла листовой заготовки,  $z \in [(d_1 + h), ((d_1 + h) + d_2)]$ ,

$$E_{\Phi}^{(4)}(p, \lambda, z) = A_1(p, \lambda) \cdot e^{q_2(p, \lambda)(z - (d_1 + h))} + A_2(p, \lambda) \cdot e^{-q_2(p, \lambda)(z - (d_1 + h))}, \quad (22)$$

$$H_r^{(4)}(p, \lambda, z) = \frac{q_2(p, \lambda)}{p \mu_0} [A_1(p, \lambda) \cdot e^{q_2(p, \lambda)(z - (d_1 + h))} - A_2(p, \lambda) \cdot e^{-q_2(p, \lambda)(z - (d_1 + h))}], \quad (23)$$

где  $A_{1,2}(p, \lambda)$  – произвольные постоянные интегрирования,

д) в свободном полупространстве с внешней стороны металлического листа,  $z \in [((d_1 + h) + d_2), \infty]$ , условию ограниченности при  $z \rightarrow \infty$  удовлетворяют функции:

$$E_{\Phi}^{(5)}(p, \lambda, z) = G_1(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot (z - ((d_1 + h) + d_2))}, \quad (24)$$

$$H_r^{(5)}(p, \lambda, z) = -\frac{\lambda}{p \mu_0} \cdot G(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot (z - ((d_1 + h) + d_2))}, \quad (25)$$

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

Из условия непрерывности касательных компонент напряжённости электромагнитного поля на границах выделенных областей можно получить систему линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных произвольных постоянных интегрирования в выражениях для  $E_{\Phi}(p, \lambda, z)$  и  $H_r(p, \lambda, z)$ .

1)  $z = 0$

$$\begin{cases} C_1(p, \lambda) + C_2(p, \lambda) = B(p, \lambda); \\ C_1(p, \lambda) - C_2(p, \lambda) = \frac{\lambda}{q_1(p, \lambda)} B(p, \lambda). \end{cases} \quad (26)$$

2)  $z = d_1$ ,

$$\begin{cases} C_1(p, \lambda) \cdot e^{q_1(p, \lambda) \cdot d_1} + C_2(p, \lambda) \cdot e^{-q_1(p, \lambda) \cdot d_1} + \frac{K(p, \lambda)}{q_1^2(p, \lambda)} \cdot [\text{ch}(q_1(p, \lambda) \cdot g) - 1] = D_1(p, \lambda) + D_2(p, \lambda); \\ C_1(p, \lambda) \cdot e^{q_1(p, \lambda) \cdot d_1} - C_2(p, \lambda) \cdot e^{-q_1(p, \lambda) \cdot d_1} + \frac{K(p, \lambda)}{q_1^2(p, \lambda)} \text{sh}(q_1(p, \lambda) \cdot g) = \frac{\lambda}{q_1(p, \lambda)} (D_1(p, \lambda) - D_2(p, \lambda)). \end{cases} \quad (27)$$

3)  $z = d_1 + h$ ,

$$\begin{cases} D_1(p, \lambda) e^{\lambda h} + D_2(p, \lambda) e^{-\lambda h} = A_1(p, \lambda) + A_2(p, \lambda); \\ D_1(p, \lambda) \cdot e^{\lambda h} - D_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda h} = \frac{q_2(p, \lambda)}{\lambda} \times (A_1(p, \lambda) - A_2(p, \lambda)). \end{cases} \quad (28)$$

4)  $z = (d_1 + h + d_2)$ ,

$$\begin{cases} A_1(p, \lambda) e^{q_2(p, \lambda) d_2} + A_2(p, \lambda) e^{-q_2(p, \lambda) d_2} = G(p, \lambda); \\ A_1(p, \lambda) \cdot e^{q_2(p, \lambda) d_2} - A_2(p, \lambda) \cdot e^{-q_2(p, \lambda) d_2} = \\ = -\frac{\lambda}{q_2(p, \lambda)} G(p, \lambda). \end{cases} \quad (29)$$

В конечном итоге представляют интерес поля, возбуждаемые в металлах вспомогательного экрана и листовой заготовки. Для их определения следует найти неизвестные произвольные постоянные интегрирования  $C_{1,2}(p, \lambda)$  и  $A_{1,2}(p, \lambda)$ .

Согласно постановке задачи экран обладает конечной толщиной, что соответствует реальности. Но листовую заготовку, не нарушая адекватности принятой физико-математической модели в целом, можно считать достаточно тонкостенной и для неё рабочие частоты действующих полей довольно низкими [1], так, что  $\omega \cdot \tau_2 \ll 1$   $\tau_2 = \mu_0 \cdot \gamma_2 \cdot d_2^2$ , а  $|p \mu_0 \gamma_2| \rightarrow 0$  и  $q_2(p, \lambda) \approx \lambda$

Решая системы (26 – 29) определяем, что

$$A_1(p, \lambda) \approx 0, \quad D_1(p, \lambda) \approx 0; \quad (30)$$

$$A_2(p, \lambda) \approx D_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda h}; \quad (31)$$

$$C_1(p, \lambda) = -\left(1 + \frac{q_1(p, \lambda)}{\lambda}\right) \cdot \frac{K(p, \lambda)}{q_1^2(p, \lambda)} \cdot \frac{F_1(p, \lambda, g)}{F_2(p, \lambda, d_1)}; \quad (32)$$

$$D_2(p, \lambda) = -\frac{2K(p, \lambda)}{q_1^2(p, \lambda)} \left[ \frac{F_1(p, \lambda, g)}{F_2(p, \lambda, d_1)} \cdot F_2(p, \lambda, d_1) - \operatorname{sh}^2\left(\frac{q_1(p, \lambda) \cdot g}{2}\right) \right], \quad (33)$$

где

$$F_1(p, \lambda, g) = \operatorname{sh}\left(\frac{q_1(p, \lambda) \cdot g}{2}\right) \cdot \left[ \operatorname{sh}\left(\frac{q_1(p, \lambda) \cdot g}{2}\right) + \frac{q_1(p, \lambda)}{\lambda} \operatorname{ch}\left(\frac{q_1(p, \lambda) \cdot g}{2}\right) \right],$$

$$F_2(p, \lambda, d_1) = \left[ \left(1 + \left(\frac{q_1(p, \lambda)}{\lambda}\right)^2\right) \operatorname{sh}(q_1(p, \lambda) d_1) + 2 \frac{q_1(p, \lambda)}{\lambda} \operatorname{ch}(q_1(p, \lambda) d_1) \right],$$

$$F_3(p, \lambda, d_1) = \left[ \operatorname{sh}(q_1(p, \lambda) d_1) + \frac{q_1(p, \lambda)}{\lambda} \operatorname{ch}(q_1(p, \lambda) d_1) \right].$$

Подставляя в соотношение (31) значение  $D_2(p, \lambda)$ , определяем  $A_2(p, \lambda)$ .

$$A_2(p, \lambda) = -\frac{2K(p, \lambda)}{q_1^2(p, \lambda)} \left[ \frac{F_1(p, \lambda, g)}{F_2(p, \lambda, d_1)} \cdot F_2(p, \lambda, d_1) - \operatorname{sh}^2\left(\frac{q_1(p, \lambda) \cdot g}{2}\right) \right] \cdot e^{-\lambda h}. \quad (34)$$

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрено возбуждение индукционной индукторной системы с одновитковым цилиндрическим соленоидом, массивным вспомогательным экраном конечной толщины и немагнитной тонкостенной листовой заготовкой.

2. Получена система линейных алгебраических уравнений, из которых могут быть найдены неизвестные произвольные постоянные интегрирования в выражениях для компонент вектора напряжённости, соответствующие произвольному временно́му режиму действующих полей и, соответственно, произвольной геометрии экрана и обрабатываемого объекта.

3. В приближении достаточной тонкостенности заготовки, что практически соответствует интенсивному проникновению действующих полей, получены аналитические зависимости для расчёта основных характеристик электродинамических процессов в предложенном инструменте магнитно-импульсного притяжения листовых металлов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с неферромагнитными массивным экраном и листовой заготовкой. // Электротехника і електромеханіка. – Х.: 2009.– № 4.– С. 56-59.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Изд. второе, переработанное и дополненное под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. Харьков: Изд. МОСТ-Торнадо. 2003. 288 с.
3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Чаплыгин Е.А., Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах. // Электротехника і електромеханіка. Харків. 2005, №3, С. 9-73.
4. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А., Цилиндрическая индукционная индукторная система для притяжения тонкостенных листовых металлов. // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. №11 (47), С. 109-117.
5. Yu.V.Batygin, V.I.Lavinsky, L.T.Khimenko, Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P.157-160.
6. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бондаренко А.Ю., Силовое взаимодействие низкочастотных магнитных полей с тонкостенными листовыми проводниками. // Труды международной научно-технической конференции "Магнитно-импульсная обработка металлов. Пути совершенствования и развития". Самара, 18-19 сентября 2007.С. 14 – 22.
7. Дж. Мэтьюз, Р. Уокер, Математические методы физики. М: Атомиздат. 1972. 390 с.

Поступила 03.06.2009

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., с.н.с.  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ,  
кафедра "Автомобильная электроника"  
тел. (8-057) 700-38-52, e-mail: kalifus@yandex.ru.

## ФОРМИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ НА ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКЕ

*У роботі розглянуто формування випробувального імпульсу напруги на ємнісному навантаженні з використанням формуючого двополюсника. Наведено матеріали для вибору структури та значень елементів формуючого двополюсника.*

*В роботі розглянуто формування испытательного імпульса напруги на ємкостній нарузці з використанням формуючого двухполюсника. Приведено матеріали для вибору структури та значень елементів формуючого двухполюсника.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Одним из путей обеспечения надежной работы электротехнического оборудования является проведение его испытаний на устойчивость к воздействию импульсных электромагнитных факторов, имеющих место в процессе эксплуатации. Такие испытания проводятся с использованием высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ), сооружаемые на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ).

Многообразие форм импульсов, используемых при проведении испытаний, определяет необходимость совершенствования методов выбора параметров разрядных цепей испытательных установок.

**Анализ публикаций** Испытательные импульсы могут быть заданы аналитическим выражением и контролируемые параметрами [1, 2]. Аналитическое описание позволяет наряду с натурными испытаниями проводить математический анализ реакции технических средств на испытательное воздействие.

Вопросу выбора параметров разрядных цепей испытательных устройств при задании испытательного импульса аналитическим выражением посвящен ряд работ [3 – 8]. В данных публикациях рассматриваются ВИИУ, работающие на активно-индуктивную нагрузку, которая достаточно широко распространена при испытаниях. Однако в практике высоковольтных испытаний значительное место занимают также испытания объектов, имеющих емкостной характер (изоляция конструкции, конденсаторы, кабели и т.п.). Для таких нагрузок разработаны методы выбора параметров разрядных цепей ВИИУ, которые в основном базируются на задании испытательного импульса напряжения контролируемыми параметрами (например, [9]), а синтез разрядных цепей ВИИУ при задании испытательного импульса напряжения аналитическим выражением не нашел достаточно полного отражения в исследованиях.

**Целью** настоящей работы является получение соотношений для выбора параметров разрядной цепи испытательного устройства, формирующего на емкостной нагрузке импульс напряжения, заданный аналитическим выражением.

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим схему испытательного устройства, приведенную на рис. 1. Разрядная цепь ВИИУ включа-

ет: ЕНЭ, параметрами которого являются  $U(0)$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $L$  – соответственно зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность;  $F$  – коммутатор (идеальный ключ);  $C_H$  – емкость нагрузки; формирующий двухполюсник, который подключается параллельно нагрузке и предназначен для обеспечения требуемых параметров испытательного импульса на ней ( $Y_{FD}$  – проводимость формирующего двухполюсника).

Используя операторный метод расчета линейных электрических цепей [10], можно показать, что в данной схеме на емкостной нагрузке может быть сформирован импульс напряжения, для которого операторное изображение по Лапласу имеет вид:

$$U_{ab} = \frac{\sum_{k=0}^{m-3} p^k \cdot A_k}{\sum_{k=0}^m p^k \cdot B_k} \quad (1)$$

где  $A_k$ ,  $B_k$  – коэффициенты полиномов числителя и знаменателя операторного изображения; порядок импульса (наибольшая степень полинома знаменателя [6])  $m \geq 3$ .

Данное операторное изображение соответствует импульсам напряжения различной формы, в частности, представимой экспоненциальным полиномом  $m$  – го порядка вида [7]:

$$u(t) = \sum_{j=0}^m \alpha_j \cdot e^{-\beta_j t}, \quad (2)$$

где  $\alpha_j$  и  $\beta_j$  – коэффициенты формы.

В общем случае, операторное изображение формы импульса напряжения (2) содержит  $A$  – коэффициенты вплоть до  $(m - 2)$  степени, но в соответствии с (1), соотношение между коэффициентами формы импульса напряжения (2) должно быть таковым, чтобы от нуля отличались только  $A$  – коэффициенты при  $(m - 3)$  низших степенях операторного изображения (1).

Общие формулы для определения коэффициентов  $A_k$  и  $B_k$  операторного изображения импульса (2) приведены в [6]. Там же даны частные соотношения для импульсов третьего порядка ( $m = 3$ ). Соотношения для определения коэффициентов операторного изображения (1) импульсов 4-го порядка представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициент	Соотношения для определения коэффициентов
$A_0$	$\alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 + \alpha_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 + \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_4 + \alpha_4 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3$
$A_1$	$\alpha_1 \cdot (\beta_2 \cdot \beta_3 + \beta_2 \cdot \beta_4 + \beta_3 \cdot \beta_4) + \alpha_2 \cdot (\beta_1 \cdot \beta_3 + \beta_1 \cdot \beta_4 + \beta_3 \cdot \beta_4) + \alpha_3 \cdot (\beta_1 \cdot \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_4 + \beta_2 \cdot \beta_4) + \alpha_4 \cdot (\beta_1 \cdot \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_3 + \beta_2 \cdot \beta_3)$
$A_2$	$\alpha_1 \cdot (\beta_2 + \beta_3 + \beta_4) + \alpha_2 \cdot (\beta_1 + \beta_3 + \beta_4) + \alpha_3 \cdot (\beta_1 + \beta_2 + \beta_4) + \alpha_4 \cdot (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)$
$B_0$	$\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$
$B_1$	$\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 + \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_4 + \beta_1 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 + \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$
$B_2$	$\beta_1 \cdot \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_3 + \beta_1 \cdot \beta_4 + \beta_2 \cdot \beta_3 + \beta_2 \cdot \beta_4 + \beta_3 \cdot \beta_4$
$B_3$	$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4$
$B_4$	1

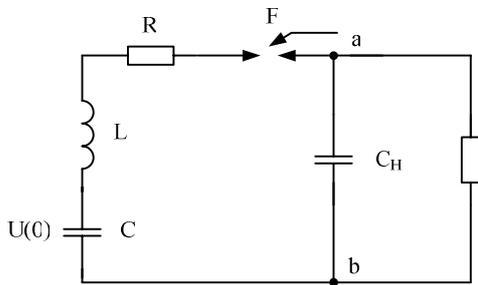


Рис. 1. Схема разрядной цепи ВИИУ

В соответствии с вышеописанными требованиями к коэффициентам операторного изображения импульса (2), для импульса 4-го порядка должно выполняться условие  $A_2 = 0$ .

Полагая, что заданы параметры ЕНЭ –  $U(0)$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $L$  и аналитическое выражение импульса напряжения на известной емкостной нагрузке  $C_H$ , определим структуру и параметры элементов формирующего двухполюсника. Можно показать, что операторная проводимость формирующего двухполюсника определяется из соотношения:

$$Y_{FD} = \frac{\sum_{k=0}^m p^k \cdot V_{0,k}}{\sum_{k=0}^{m-1} p^k \cdot W_{0,k}}, \quad (3)$$

где коэффициенты полиномов числителя и знаменателя имеют вид:

$$\begin{aligned} & \text{– для } 0 \leq k \leq m \\ & V_{0,k} = C \cdot [B_k \cdot U(0) - g(1 \leq k \leq m-2) \cdot A_{k-1}] - \\ & - C_H \cdot [g(1 \leq k \leq m-2) \cdot A_{k-1} + \\ & + g(2 \leq k \leq m-1) \cdot R \cdot C \cdot A_{k-2} - \\ & - g(3 \leq k \leq m) \cdot L \cdot C \cdot A_{k-3}]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{– для } 0 \leq k \leq m-1 \\ & W_{0,k} = g(0 \leq k \leq m-3) \cdot A_k + \\ & + g(1 \leq k \leq m-2) \cdot R \cdot C \cdot A_{k-1} + \\ & + g(2 \leq k \leq m-1) \cdot L \cdot C \cdot A_{k-2}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } g(a \leq k \leq b) = \begin{cases} 1, & k \geq a \wedge k \leq b, \\ 0, & \neg(k \geq a \wedge k \leq b). \end{cases}$$

Для импульсов напряжения третьего и четвертого порядков коэффициенты операторной проводимости (3), определенные из общих соотношений (4) и (5), приведены в табл. 2.

Используя методы синтеза двухполюсников [10] можно показать, что структура формирующего двухполюсника с операторной проводимостью (3) может быть представлена в виде многозвенной цепи, показанной на рис. 2. Цепь содержит два типа звеньев: нечетные, которые представляют собой параллельное соединение емкости ( $C_k$ ) и проводимости ( $Y_k$ ), и четные, состоящие из последовательно соединенных индуктивности ( $L_k$ ) и активного сопротивления ( $R_k$ ).

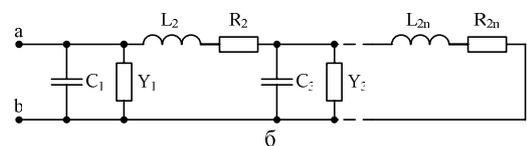
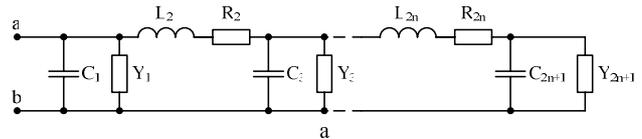


Рис. 2

Причем количество звеньев формирующего двухполюсника равно порядку импульса напряжения. При нечетном порядке импульса цепь заканчивается звеном, состоящем из параллельно соединенных емкости и проводимости (рис. 2а), при четном порядке импульса – последовательно соединенными индуктивностью и активным сопротивлением (рис. 2б). Значения элементов формирующего двухполюсника определяются по соотношениям:

– для нечетных звеньев  $k = 1, 3, 5, \dots, 2n + 1$

$$C_k = \frac{V_{k-1,m-(k-1)}}{W_{k-1,m-k}}; \quad (6)$$

$$Y_k = \frac{V_{k,m-k}}{W_{k-1,m-k}}, \quad (7)$$

– для четных звеньев  $k = 2, 4, 6, \dots, 2n$

$$L_k = \frac{W_{k-2,m-(k-1)}}{V_{k,m-k}}; \quad (8)$$

$$R_k = \frac{W_{k-1,m-k}}{V_{k,m-k}}. \quad (9)$$

Коэффициенты, входящие в выражения (6) – (9), определяются по следующим рекуррентным соотношениям:

– для нечетных  $j = 1, 3, 5, \dots, 2n + 1$   
при  $1 \leq j \leq m$ ,  $0 \leq s \leq m - j$ ;

$$V_{j,s} = V_{j-1,s} - \eta(s \geq 1) \cdot V_{j-1,m-j+1} \cdot \frac{W_{j-1,s-1}}{W_{j-1,m-j}}, \quad (10)$$

при  $1 \leq j \leq m$ ,  $0 \leq s \leq m - j - 1$

$$W_{j,s} = W_{j-1,s} - \eta(s \geq 1) \cdot W_{j-1,m-j} \cdot \frac{V_{j+1,s-1}}{V_{j+1,m-j-1}}, \quad (11)$$

где  $\eta(s \geq 1) = \begin{cases} 1, & s \geq 1, \\ 0, & s < 1. \end{cases}$

– для четных  $j = 2, 4, 6, \dots, 2n$   
при  $2 \leq j \leq m, 0 \leq s \leq m - j$

$$V_{j,s} = V_{j-1,s} - V_{j-1,m-j+1} \cdot \frac{W_{j-2,s}}{W_{j-2,m-j+1}}, \quad (12)$$

при  $2 \leq j \leq m, 0 \leq s \leq m - j - 1$

$$W_{j,s} = W_{j-1,s} - W_{j-1,m-j} \cdot \frac{V_{j,s}}{V_{j,m-j}}. \quad (13)$$

Условием физической реализуемости формирующего двухполюсника является положительность всех коэффициентов операторной проводимости (4) и

(5), а также коэффициентов, участвующих в определении значений элементов формирующего двухполюсника (6) – (13) [10].

Для импульсов напряжения третьего порядка выражения (6) – (9) принимают вид:

$$C_1 = \frac{V_{0,3}}{W_{0,2}}, \quad Y_1 = \frac{V_{1,2}}{W_{0,2}}, \quad L_2 = \frac{W_{0,2}}{V_{2,1}}, \quad (14)$$

$$R_2 = \frac{W_{1,1}}{V_{2,1}}, \quad C_3 = \frac{V_{2,1}}{W_{2,0}}, \quad Y_3 = \frac{V_{3,0}}{W_{2,0}}.$$

Значения  $V$  и  $W$  – коэффициентов определяются по табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

Коэффициент	$m = 3$	$m = 4$
$V_{0,0}$	$C \cdot B_0 \cdot U(0)$	$C \cdot B_0 \cdot U(0)$
$V_{0,1}$	$C \cdot [B_1 \cdot U(0) - A_0] - C_H \cdot A_0$	$C \cdot [B_1 \cdot U(0) - A_0] - C_H \cdot A_0$
$V_{0,2}$	$C \cdot B_2 \cdot U(0) - C_H \cdot R \cdot C \cdot A_0$	$C \cdot [B_2 \cdot U(0) - A_1] - C_H \cdot (A_1 + R \cdot C \cdot A_0)$
$V_{0,3}$	$C \cdot B_3 \cdot U(0) - C_H \cdot L \cdot C \cdot A_0$	$C \cdot B_3 \cdot U(0) - C_H \cdot (R \cdot C \cdot A_1 + L \cdot C \cdot A_0)$
$V_{0,4}$	–	$C \cdot B_4 \cdot U(0) - C_H \cdot L \cdot C \cdot A_1$
$W_{0,0}$	$A_0$	$A_0$
$W_{0,1}$	$R \cdot C \cdot A_0$	$A_1 + R \cdot C \cdot A_0$
$W_{0,2}$	$L \cdot C \cdot A_0$	$R \cdot C \cdot A_1 + L \cdot C \cdot A_0$
$W_{0,3}$	–	$L \cdot C \cdot A_1$

Таблица 3

Коэффициент	Соотношения для определения коэффициентов
$V_{1,0}$	$V_{0,0}$
$V_{1,1}$	$V_{0,1} - V_{0,3} \cdot \frac{W_{0,0}}{W_{0,2}}$
$V_{1,2}$	$V_{0,2} - V_{0,3} \cdot \frac{W_{0,1}}{W_{0,2}}$
$V_{2,0}$	$V_{1,0} - V_{1,2} \cdot \frac{W_{0,0}}{W_{0,2}}$
$V_{2,1}$	$V_{1,1} - V_{1,2} \cdot \frac{W_{0,1}}{W_{0,2}}$
$W_{1,0}$	$W_{0,0}$
$W_{1,1}$	$W_{0,1} - W_{0,2} \cdot \frac{V_{2,0}}{V_{2,1}}$
$W_{2,0}$	$W_{1,0} - W_{1,1} \cdot \frac{V_{2,0}}{V_{2,1}}$
$V_{3,0}$	$V_{2,0}$

Рассмотренные выше материалы могут быть использованы для выбора параметров эквивалентной одноступенчатой схемы ГИН, показанной на рис. 3.

Зарядное напряжение  $U(0)$  представляет собой сумму зарядных напряжений всех накопительных конденсаторов, емкость  $C$  является емкостью ГИН "в ударе",  $R$  и  $L$  – эквивалентное активное сопротивление и индуктивность разрядников и демпфирующих

резисторов,  $R_p$  – разрядное сопротивление ГИН,  $C_{\Pi}$  – паразитная емкость ГИН.

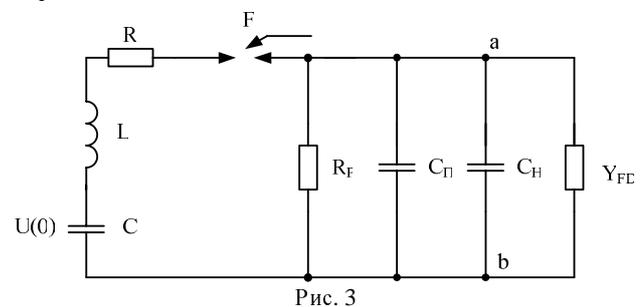


Рис. 3

Учет рассмотренных особенностей ВИИУ, схема которого приведена на рис. 3, при выборе параметров формирующего двухполюсника производится изменением значения элементов его первого звена:

– скорректированное значение емкости первого звена

$$C_1^* = C_1 - C_{\Pi}, \quad (15)$$

где  $C_1$  – значение, рассчитанное по (6).

– скорректированное значение проводимости первого звена

$$Y_1^* = Y_1 - \frac{1}{R_p}, \quad (16)$$

где  $Y_1$  – значение, рассчитанное по (7).

В качестве иллюстрации применения приведенных в статье материалов рассмотрим следующий пример.

Напряжение, воздействующее на изоляционные конструкции при протекании фазного тока во вторич-

ной обмотке трансформатора, питающего здание, в случае поражения молнией молниеприемника, подсоединенного к заземлителю этого здания, может быть описано следующей зависимостью [8] ( $A_n$  – нормирующий коэффициент в вольтах;  $t$  – время в секундах):

$$u(t) = A_n \left( 6,5 \cdot 10^3 \cdot e^{-2,6 \cdot 10^4 \cdot t} + 6,5 \cdot 10^3 \cdot e^{-7,7 \cdot 10^5 \cdot t} - 1,3 \cdot 10^4 \cdot e^{-3,98 \cdot 10^5 \cdot t} \right). \quad (17)$$

Примем величину нормирующего коэффициента  $A_n = 1$  В. Тогда коэффициенты операторного изображения импульса (17) принимают следующие значения:  $A_0 = 1,8 \cdot 10^{15}$ ;  $B_0 = 7,97 \cdot 10^{15}$ ;  $B_1 = 3,37 \cdot 10^{11}$ ;  $B_2 = 1,19 \cdot 10^6$ ;  $B_3 = 1$ . Для  $U(0) = 2 \cdot 10^4$  В;  $C = 5 \cdot 10^{-5}$  Ф;  $R = 0,5$  Ом;  $L = 5 \cdot 10^{-7}$  Гн;  $C_H = 2 \cdot 10^{-7}$  Ф по соотношениям табл. 2 (при  $m = 3$ ) определим  $V$  – и  $W$  – коэффициенты операторной проводимости формирующего двухполюсника:  $V_{0,0} = 7,97 \cdot 10^{15}$ ;  $V_{0,1} = 2,47 \cdot 10^{11}$ ;  $V_{0,2} = 1,19 \cdot 10^6$ ;  $V_{0,3} = 9,91 \cdot 10^{-1}$ ;  $W_{0,0} = 1,8 \cdot 10^{15}$ ;  $W_{0,1} = 4,5 \cdot 10^{10}$ ;  $W_{0,2} = 4,5 \cdot 10^4$ . Далее с использованием соотношения (14) и данных табл. 3 вычислим значения элементов формирующего двухполюсника:  $C_1 = 2,2 \cdot 10^{-5}$  Ф;  $Y_1 = 4,31$  Ом $^{-1}$ ;  $L_2 = 3,49 \cdot 10^{-6}$  Гн;  $R_2 = 3,44$  Ом;  $C_3 = 1,19 \cdot 10^{-5}$  Ф;  $Y_1 = 1,92$  Ом $^{-1}$ .

Моделирование переходного процесса с рассчитанными параметрами, проведенное по программе Micro-Cap, показывает полное совпадение импульса напряжения на емкостной нагрузке с требуемым импульсом (17).

## ВЫВОДЫ

1. В работе получил дальнейшее развитие метод формирующего двухполюсника для синтеза разрядной цепи высоковольтного испытательного устройства, которое формирует на емкостной нагрузке импульс напряжения, заданный аналитическим выражением.

2. Показано, что импульс напряжения может быть сформирован с использованием формирующего двухполюсника, подключаемого параллельно емкостной нагрузке.

Материалы, приведенные в работе, могут быть использованы для разработки методов формирования испытательного импульса напряжения на комплексных нагрузках, которые включают емкостной элемент.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник / В.И. Кравченко – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
2. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
3. Кравченко В.И. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии / В.И. Кравченко, А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 70 – 75.
4. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку / А.А. Петков // Электротехніка. – 1990. - №10. – С. 35 – 36.
5. Петков А.А. Учет характеристик коммутаторов при анализе и синтезе разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – С. 68 – 72.
6. Петков А.А. Формирование испытательного импульса тока в активно-индуктивной нагрузке / А.А. Петков // Электротехніка. - 2006. - №4. – С. 34 - 37.
7. Петков А.А. Формирование испытательных импульсов тока сложной формы / А.А. Петков // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". - №4. – 2004. – С. 22 – 30.
8. Петков А.А. Формирование импульсов тока, сопровождающих грозовую деятельность / А.А. Петков, Д.Г. Колиущко // Технічна електродинаміка. - 2006. – Ч.4., Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – С. 21 - 24.
9. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / [В.О. Бржезицький, А.В. Ісакова, В.В. Рудаков та ін.]; за ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПИ" – Торнадо, 2005. – 930 с.
10. Бессонов Л.А. Линейные электрические цепи: Учеб. пособие для электротехнич. и радиотехнич. специальностей вузов / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. школа, 1974. – 320 с.

Поступила 21.06.2009

*Петков Александр Александрович*, 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

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Приведена імітаційна модель тягового вентиляно-індукторного електроприводу, яка дозволяє врахувати геометричні параметри індукторного двигуна і його системи живлення та керування*

*Приведена имитационная модель тягового вентиляно-индукторного электропривода, позволяющая учесть геометрические параметры индукторного двигателя и его системы питания и управления*

### ВВЕДЕНИЕ

Создание скоростного электроподвижного состава является актуальной задачей для предприятий железнодорожного машиностроения Украины. Главным требованием, которое следует предъявить к такому подвижному составу – это повышение качества пассажирских перевозок при сохранении их стоимости на приемлемом уровне. И, если первое требование связано с повышением комфортабельности поездки и улучшением инфраструктуры транспорта в целом, то второе – стоимость перевозок – напрямую связано с эксплуатационными затратами. На наш взгляд, в условиях постоянного роста цен на энергоносители создание тягового электропривода, обладающего высокой энергетической эффективностью при одновременно низких издержках на его обслуживание и ремонт, является основным путём для повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта [1,2].

В мировой практике скоростные поезда стоятся по концепции распределённой тяги и оборудуются асинхронным тяговым приводом. В то же время, ведущие мировые производители подвижного состава ведут интенсивные разработки тяговых приводов на основе различных типов синхронных машин. Одним из направлений является разработка вентиляно-индукторного электропривода (ВИЭП), который сочетает в себе реактивный индукторный двигатель и полумостовой инвертор напряжения. Согласно исследованием [3-5], энергетическая эффективность ВИЭП на 2-5% выше, чем асинхронного привода, а простота конструкции двигателя и схемы инвертора делают его более привлекательным для изготовителей и эксплуатационников.

Тем не менее, сложность процессов электро-механического преобразования энергии в реактивном индукторном двигателе (РИД) (и тем более, в тяговом тракте подвижного состава) в сочетании с отсутствием апробированных методов его проектирования является серьёзной проблемой на пути внедрения этих приводов. Выходом из этой ситуации представляется исследование работы ВИЭП с помощью имитационного моделирования.

Цель работы: создание имитационной модели тягового вентиляно-индукторного электропривода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

- разработать математическую, имитационно-ориентированную модель для применения её в современных системах компьютерной математики, в частности, в пакете визуального программирования Simlink. Такой подход, на наш взгляд, позволяет бо-

лее эффективно организовать процесс исследования ВИЭП, исключив из него этап формирования системы дифференциальных уравнений в виде задачи Коши и написание процедур численного интегрирования. Подходы блочного моделирования позволяют легко изменять структуру ВИЭП (особенно схемы полупроводниковых преобразователей) без "переписывания" исходной системы дифференциальных уравнений;

- разработать методы определения параметров и функциональных связей, которые присутствуют в имитационной модели и достоверно отображают параметры реальных устройств ВИЭП.

В данной статье ограничимся рассмотрением части тягового привода, включающей в себя реактивный индукторный двигатель и инвертор напряжения. Механическая часть привода упрощенно представлена одностепенной системой.

### МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для составления расчетных уравнений математической модели использована принципиальная схема силовых цепей тягового ВИЭП, приведенная на рис. 1, для которой составлена система уравнений, описывающая его электромагнитные процессы.

При построении модели приняты следующие основные допущения: магнитная система двигателя симметричная; вихревые токи и гистерезис в магнитопроводе не учитываются; активные сопротивления фаз равны; источник питания обладает свойствами идеального источника электродвижущей силы, ключи преобразователя имеют идеальную вольт-амперную характеристику.

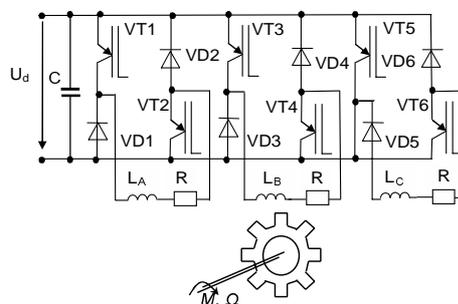


Рис.1 Принципиальная схема силовых цепей тягового ВИЭП. С – конденсатор; VT1-VT6 – ключи; VD1-VD6 – запирающие диоды; L<sub>A</sub>, L<sub>B</sub>, L<sub>C</sub> – индуктивности фазы А, В, С соответственно; R – активное сопротивление фазы

Система состоит из трех уравнений электрического равновесия и двух уравнений механики привода:

$$\begin{cases} \frac{di_A}{dt} = \left( \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_A} \right)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u_A - i_A R - \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_B} \cdot \frac{di_B}{dt} - \\ - \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_C} \cdot \frac{di_C}{dt} - \Omega \frac{\partial \Psi_A}{\partial \gamma} \end{pmatrix} \\ \frac{di_B}{dt} = \left( \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_B} \right)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u_B - i_B R - \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_A} \cdot \frac{di_A}{dt} - \\ - \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_C} \cdot \frac{di_C}{dt} - \Omega \frac{\partial \Psi_B}{\partial \gamma} \end{pmatrix} \\ \frac{di_C}{dt} = \left( \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_C} \right)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u_C - i_C R - \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_A} \cdot \frac{di_A}{dt} - \\ - \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_B} \cdot \frac{di_B}{dt} - \Omega \frac{\partial \Psi_C}{\partial \gamma} \end{pmatrix} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{\text{дв}} - M_c) \\ \frac{d\gamma}{dt} = \Omega \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_A, u_B, u_C$  – напряжения, приложенные к обмоткам фаз А, В, С соответственно;  $i_A, i_B, i_C$  – токи фаз А, В, С;  $R$  – активное сопротивление;  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C$  – потокоцепления фаз А, В, С;  $\frac{\partial \Psi_x}{\partial i_y}$  –

дифференциальные индуктивности фаз;  $\frac{\partial \Psi_x}{\partial \gamma}$  – коэффициент противоЭДС,  $\gamma$  – угол поворота ротора,  $\Omega$  – частота вращения ротора,  $J$  – момент инерции ротора,  $M_{\text{дв}}$  – электромагнитный момент двигателя,  $M_c$  – момент сопротивления.

Система (1) должна быть дополнена уравнениями электромагнитных связей – зависимостями потокоцеплений фаз от токов и угла поворота ротора

$$\begin{cases} \Psi_A = f(i_A, i_B, i_C, \gamma) \\ \Psi_B = f(i_A, i_B, i_C, \gamma), \\ \Psi_C = f(i_A, i_B, i_C, \gamma) \end{cases} \quad (2)$$

а также зависимостью электромагнитного момента двигателя  $M_{\text{дв}}$  от токов фаз и угла поворота

$$M_{\text{дв}} = \sum M_x(i_A, i_B, i_C, \gamma), \quad (3)$$

и зависимостью момента сопротивления  $M_c$ .

Выражения (1)–(3) составляют математическую модель РИД.

Для численного интегрирования системы (1), необходимо определить функциональные зависимости (2) и (3). Для этого в работе предлагается следующий подход. Потокоцепления определяются на основе эквивалентной схемы замещения, вебер-амперные характеристики элементов которой получены из расчёта магнитного поля двигателя. Такой "схемно-полевой" подход реализован в методе проводимостей зубцовых контуров [6]. Дальнейшее развитие этот подход получил в исследованиях электромеханических систем с индукторными машинами [7].

Рассмотрим определение потокоцеплений на примере РИД с числом зубцов статора 12 и ротора 8.

На рис. 3 приведена схема замещения половины магнитной системы реактивного индукторного двигателя с учетом симметрии и принятого допущения о малом магнитном сопротивлении ротора.

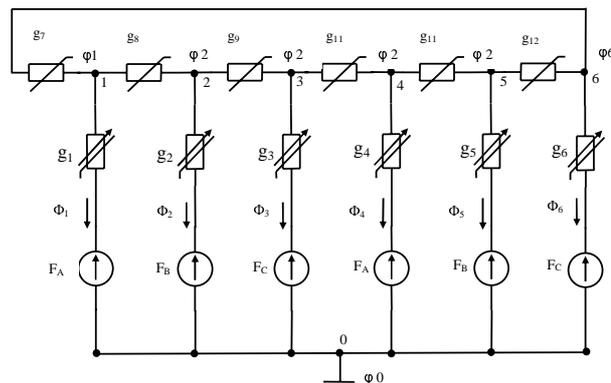


Рис. 3 – Схема замещения половины магнитной цепи реактивного индукторного двигателя.  $F_A, F_B, F_C$  – магнитодвижущая сила катушек обмоток фазы А, В, С соответственно;  $g_1 - g_6$  – нелинейно-параметрическая магнитная проводимость  $j$ -го участка зубцовой зоны, учитывающая магнитные свойства зубца статора, воздушного зазора и зубца ротора ( $j = 1, 6$ );  $g_7 - g_{12}$  – нелинейная магнитная проводимость  $k$ -го участка ярма статора,  $\varphi_i$  – магнитный потенциал узла

В предлагаемой схеме магнитные сопротивления, соответствующие зубцу статора, ротора (нелинейные элементы) и воздушному зазору (линейный элемент) представлены одним элементом – нелинейно-параметрической магнитной проводимостью (элементы  $g_1 - g_6$  на рис. 3). Вебер-амперные характеристики нелинейных элементов, эквивалентирующих ярма статора, определяются по средней кривой намагничивания электротехнической стали и геометрическим размерам выделенных объемов (элементы  $g_7 - g_{12}$  на рис. 3). Зубцовые магнитодвижущие силы  $F_A, F_B, F_C$  определены на основе матрицы структуры обмотки статора [6], которая имеет вид:

$$C = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (4)$$

Эта матрица по существу заменяет графическое описание обмотки. Используя матрицу преобразования  $C$ , можно компактно записать выражения для МДС зубцов и потокоцепления фаз, обусловленных основным магнитным полем, проходящим через воздушный зазор

$$F_{Zj} = \frac{w_k}{a} \sum_{m=1}^3 c_{mj} \cdot i_{\phi m}, \quad (5)$$

где  $w_k$  – число витков в катушке,  $a$  – число параллельных ветвей фазы обмотки статора,  $i_{\phi m}$  – ток фазы А, В, С,  $j$  – порядковый номер паза статора, принимающее значение  $j=1, 2, \dots, N$ ,  $p$  – число пар полюсов возбуждения;  $N$  – число пазов статора,  $m$  – число фаз, принимающее значение 1, 2, 3.

Семейство вебер-амперных характеристик нелинейно-параметрических проводимостей  $g_1 - g_6$  предла-

гается определять по результатам расчета магнитного поля зубцового слоя двигателя методом конечных элементов.

Графики зависимостей  $g_{\tilde{x}}(U_{\tilde{x}}, \gamma)$  приведены на рис. 4.

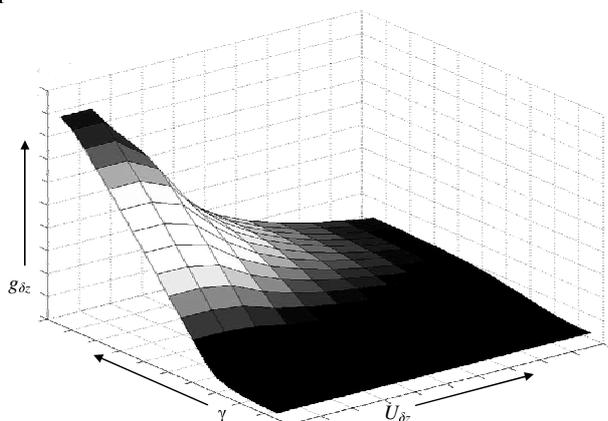


Рис. 4 – Зависимость  $g_{\tilde{x}}(U_{\tilde{x}}, \gamma)$

Полученные зависимости магнитной проводимости зубцового слоя в функции магнитного напряжения между сердечниками статора и ротора и угла поворота ротора могут быть аппроксимированы выражением вида [7]

$$g_{\tilde{x}}(U_{\tilde{x}}, \gamma) = \sum_{k=0}^N \left[ \sum_{i=0}^p (a_{k,i} \cdot U_{\tilde{x}}^i) \cdot \cos(k\gamma) \right]. \quad (6)$$

Для вычисления коэффициентов  $a_{k,i}$  проводится решение серии полевых задач при различных взаимных положения ротора относительно статора и различных значениях магнитного напряжения между сердечниками статора и ротора. Для этого были использованы программа FEMM и язык макросов Lua [8]. На рис. 5 представлено результаты расчета магнитного поля в положениях "зубец-паз" и "зубец-зубец".

По результатам цифровых экспериментов проводится разложение в ряд Фурье, коэффициенты которого представлены виде полиномиальных зависимостей.

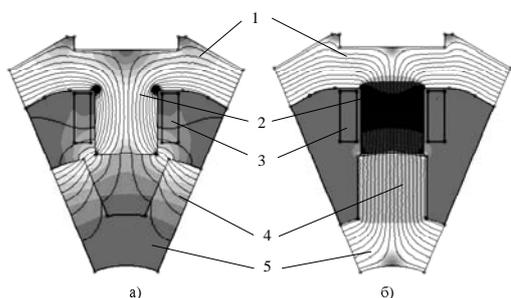


Рис. 5 – Результаты расчета магнитного поля 1 – статор; 2 – зубец статора; 3 – катушка статора; 4 – зубец ротора; 5 – ротор а) положение "зубец-паз"; б) положение "зубец-зубец"

Вебер-амперные характеристики ярем статора строятся по их геометрическим размерам и кривой намагничивания стали.

Для расчета магнитной цепи предлагается представить структуру и параметры магнитной цепи с по-

мощью топологического списка (Г-списка) [9]. Основное достоинство описания цепей с помощью Г-списка заключается в его полном соответствии наиболее эффективному машинному формированию уравнений вида

$$Y \varphi = J, \quad (7)$$

где  $\varphi = [\varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_n]^T$  – вектор-столбец искомых узловых потенциалов,  $J = [J_1 J_2 \dots J_n]^T$  – вектор-столбец известных узловых потоков,  $Y = [Y_{ij}]_{nn}$  –  $n \times n$  матрица узловых проводимостей.

Решение системы (7) позволяет получить искомые значения узловых потенциалов и неизвестные потоки ветвей цепи, а, следовательно, рассчитать потокосцепления фаз по выражению:

$$\Psi_{a\delta n} = \frac{w_k p}{a} \sum_{j=1}^N c_{jm} \Phi_{Zj} \quad (8)$$

где  $\Phi_{Zj}$  – магнитный поток  $j$ -го зубца статора.

Для определения потокосцепления фаз производится расчёт магнитной цепи для ряда положений ротора и токов фаз.

Зависимость потокосцепления фазы от тока работающей фазы приведена на рис. 6, а от тока выключающейся фазы – на рис. 7. При этом величины потокосцеплений отличаться на порядок.

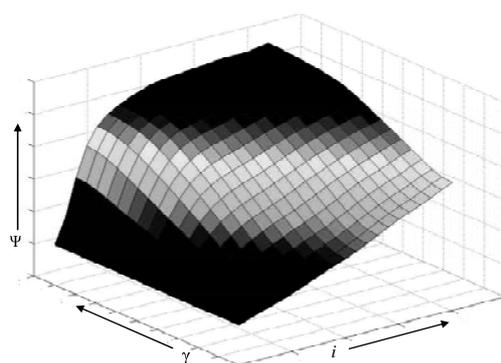


Рис. 6 – Зависимость потокосцепление от тока работающей фазы

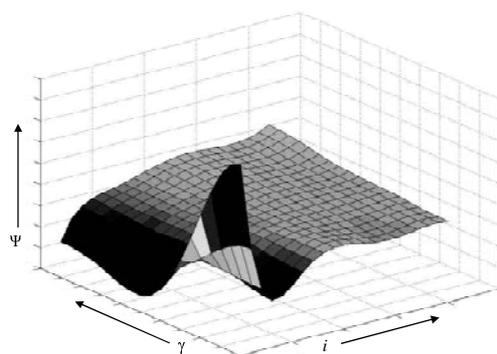


Рис. 7 – Зависимость потокосцепление от тока выключающейся фазы

Зависимость потокосцепления от тока и угла поворота может быть представлена в виде

$$\Psi_x(i_x, \gamma) = \sum_{k=0}^N \left[ \sum_{r=0}^q \left( a_{k,r} \cdot i_x^r \right) \cdot \cos(k\gamma) \right], \quad (9)$$

где  $N$  – число гармоник ряда Фурье;  $a_{k,i}$  – коэффициенты полиномов;  $q$  – степень полинома.

Для вычисления коэффициентов  $a_{k,i}$  формулы (9) используются такие же подходы, как и при описании проводимости воздушного зазора: сначала проводится разложение в ряд Фурье, затем аппроксимируются коэффициенты гармонического разложения в функции тока.

Собственная дифференциальная индуктивность  $L_\sigma = \frac{\partial \Psi_x(i_x, \gamma)}{\partial i_x}$  определяется по такому выражению:

$$L_\sigma = \sum_{k=0}^N \left[ \sum_{r=0}^q \left( a_{k,r} \cdot r \cdot i_x^{r-1} \right) \cdot \cos(k\gamma) \right] \quad (10)$$

Аналогичным выражением определяется взаимная дифференциальная индуктивность.

Коэффициент  $K_{\text{оэк}} = \frac{\partial \Psi_x(i_x, \gamma)}{\partial \gamma}$  равен

$$K_{\text{оэк}} = -Z_r \sum_{k=0}^N \left[ k \left[ \sum_{r=0}^q \left( a_{k,r} \cdot i_x^r \right) \cdot \sin(k\gamma) \right] \right] \quad (11)$$

Электромагнитный момент

$$M_x = -Z_r \sum_{k=0}^N \left[ k \left[ \sum_{r=0}^q \left( a_{k,r} \cdot \frac{i_x^{r+1}}{r+1} \right) \cdot \sin(k\gamma) \right] \right] \quad (12)$$

Зависимости  $L_\sigma = \frac{\partial \Psi_x(i_x, \gamma)}{\partial i_x}$ ,  $K_{\text{оэк}} = \frac{\partial \Psi_x(i_x, \gamma)}{\partial \gamma}$  и

$M_x(i_x, \gamma)$  приведены на рис.8, рис.9, рис.10 соответственно.

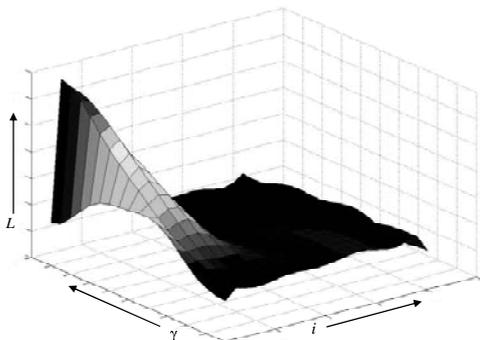


Рис. 8 – Собственная дифференциальная индуктивность фазы

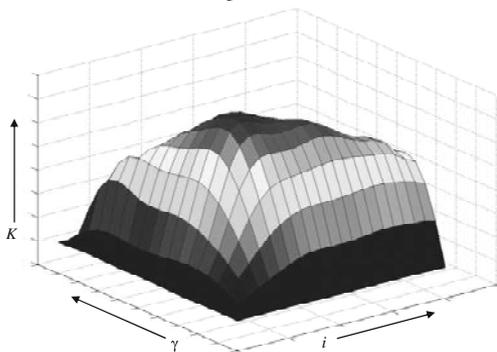


Рис. 9 – Коэффициент против ЭДС

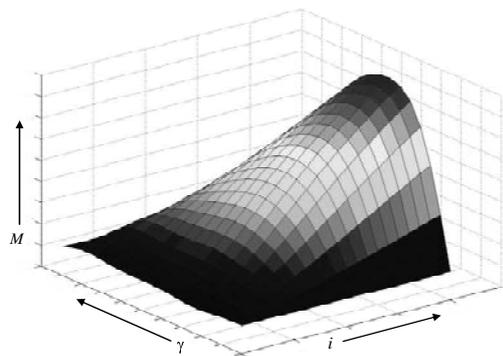


Рис. 10 – Электромагнитный момент фазы

Предлагаемая имитационная модель реализована в среде MATLAB и в его приложении Simulink [10,11]. Модель ВИЭП состоит из следующих подсистем (рис. 11): – подсистема SR\_Motor; подсистема INVERTOR; подсистема Control\_System; подсистема, описывающих механическую часть ВИЭП; регистраторы сигналов Scope 1, 2.

В подсистеме SR\_Motor "собрана" структурная схема двигателя. Блок состоит из трёх идентичных фаз (phase\_A,B,C рис. 12). На вход каждой из фаз подается значения токов  $i_A, i_B, i_C$ , угол поворота ротора  $\gamma$  и угловую  $\Omega$  скорость. Структура и принцип функционирования каждой фазы аналогичен. Ограничимся рассмотрением фазы А (рис. 13). Входные сигналы (токи и угол поворота) служат для вычисления трёх производных потокоцепления фазы А:  $\frac{d\Psi_A}{di_B}$ ,  $\frac{d\Psi_A}{di_C}$  и

$\frac{d\Psi_A}{d\gamma}$ . Вычисления реализованы в виде MATLAB-функций (блоки dPsiA/diA, dPsiA/diB, dPsiA/diC, dPsiA/dgamma рис. 13) согласно выражениям (10) и (11). После перемножения входных величин на соответствующие им производные, сигналы суммируются и подаются на вход интегратора. Далее путем интегрирования вычисляем ток фазы, а затем момент, развиваемый фазой А (блок SRM\_MOMENT рис. 12). Путем суммирования моментов фаз А, В, и С на выходе получаем электромагнитный момент  $M_{\text{об}}$ .

Преобразование постоянного напряжения на входе в переменное импульсное, которое подается на фазные обмотки двигателя, осуществляется инвертором напряжения, в основу которого положена полумостовая схема (рис.14). В данной Simulink-модели использованы управляемые IGBT-транзисторы. Входными параметрами являются сигналы, поступающие от системы управления на отпирание/запирание транзисторов. Математические модели транзисторов и диодов позаимствованы из системы Matlab/Simulink без изменений.

Подсистема Control\_System реализует систему управления ВИЭП (рис. 15). Входными сигналами являются значения токов фаз и угла поворота. На выходе имеем сигналы на включение/выключение транзисторов силового инвертора. Управление осуществляется как по "токовому коридору", так и по углу поворота ротора [3-5].

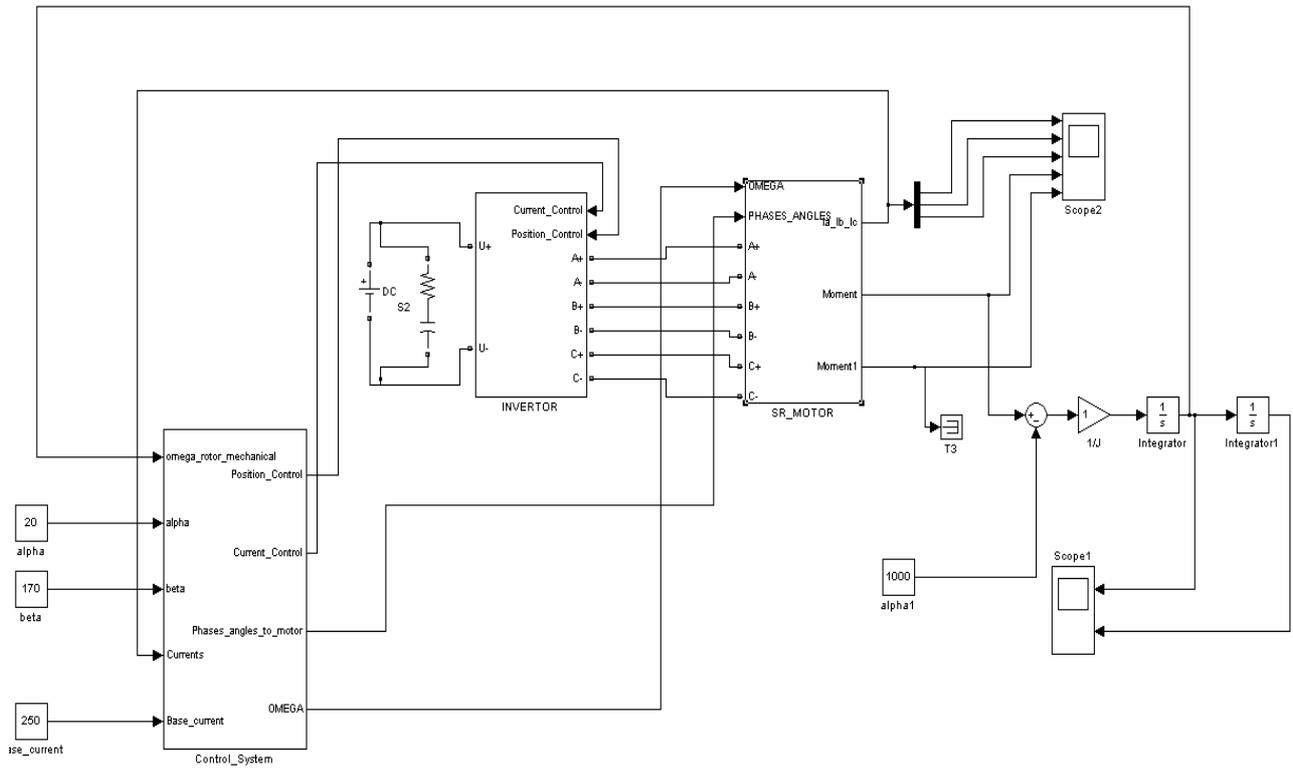


Рис. 11 – Simulink-модель ВИЭП

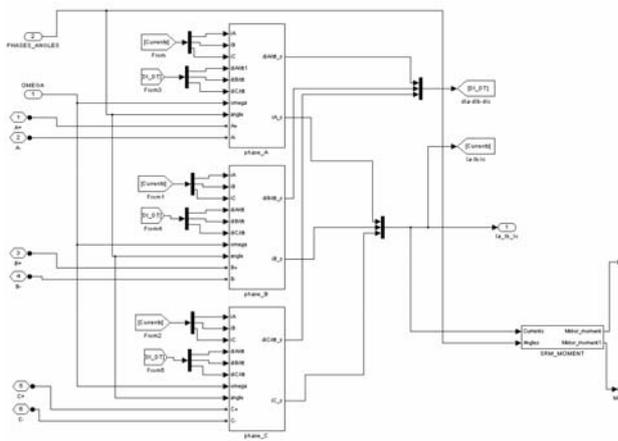


Рис. 12 – Подсистема SR\_Motor

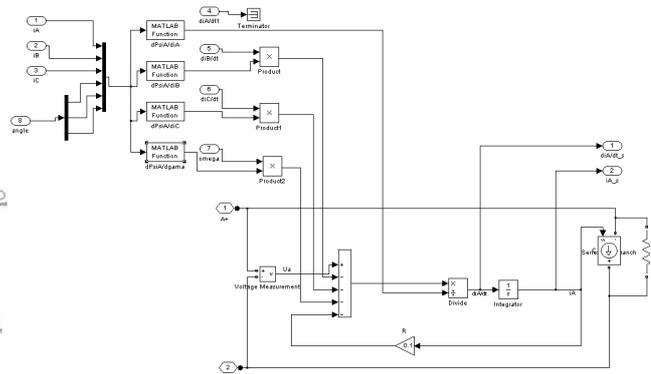


Рис. 13 – Simulink-модель фазы РИД

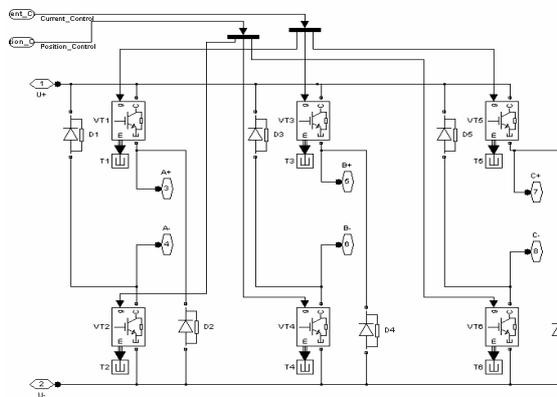


Рис. 14 – Подсистема INVERTOR

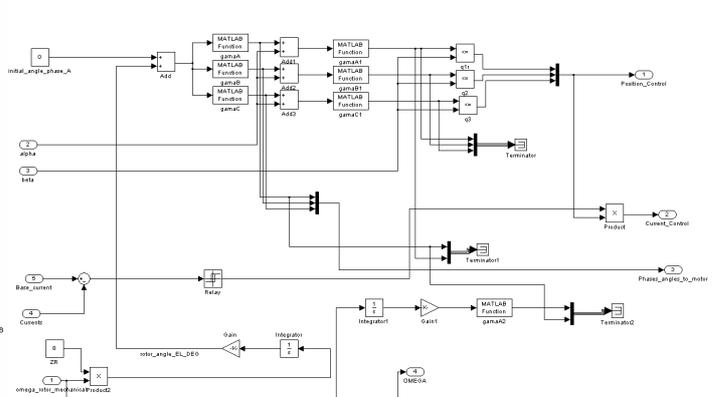


Рис. 15 – Подсистема Control\_System

В качестве примера цифрового моделирования на рис. 16 приведены осциллограммы фазных напряжений и токов при скорости вращения ротора 10 рад/с

и значение тока уставки 100 А, а на рис. 17 приведена кривая момента.

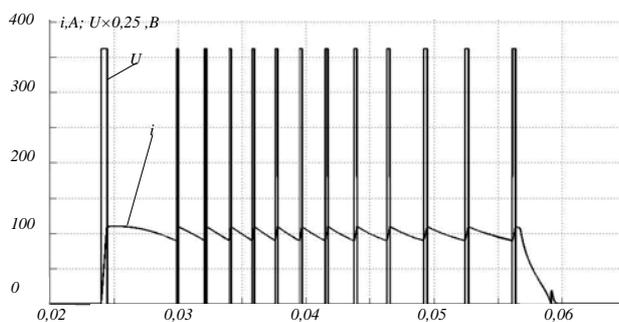


Рис. 16 – Осциллограммы токов и напряжений

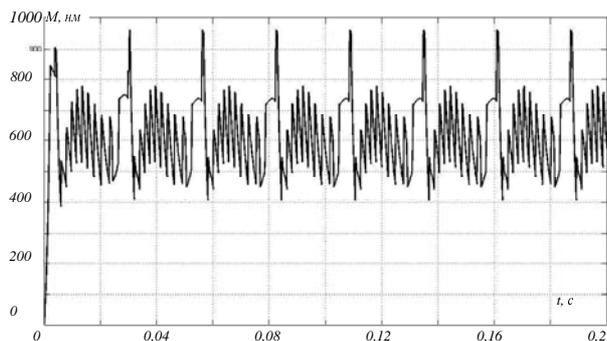


Рис. 17 – Кривая момента

## ВЫВОДЫ

1 Разработана математическая имитационно-ориентированная модель реактивного индукторного двигателя. Модель реализована в виде структурной схемы в Simulink. Особенность модели состоит в определении дифференциальных индуктивностей, коэффициента противоЭДС и момента двигателя с использованием функции, аппроксимирующие эти зависимости в виде ряда Фурье, коэффициенты которого являются полиномиальными зависимостями фазного тока.

2 Предложена методика определения электромагнитных связей в реактивном индукторном двигателе с использованием схемы замещения магнитной цепи двигателя. В основу расчёта положена обработка топологического списка цепи и автоматическое формирование расчётных уравнений по методу узловых потенциалов. Особенностью расчёта является представление вебер-амперных характеристик элементов магнитной цепи, эквивалентирующих зубцовый слой двигателя. Проводимость зубцового слоя определена методом конечных элементов и представлена усечённым рядом Фурье, коэффициенты которого представлены в виде полиномиальной функции от магнитного напряжения.

3 Разработана имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода в среде моделирования Simulink. Модель позволяет проводить исследование различных режимов работы тягового электропривода. Модель может быть дополнена уточненной моделью механической части привода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Омеляненко В. И. Анализ и сравнение перспективных тяговых электродвигателей. [Текст] / В. И. Омеляненко, Б. Г. Любарский, Е. С. Рябов, А. В. Демидов, Т. В. Глебова // *Залізничний транспорт України*. – 2008. – № 2/1. – С. 26–31.
2. Омеляненко, В. И. Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава [Текст] / В. И. Омеляненко, Б. Г. Любарский, Рябов Е. С., А. В. Демидов, Т. В. Глебова // *Локомотив-информ*. – 2008. – №1. – с. 16-19.
3. Колпахчян, Г.И. Электроприводы перспективного электроподвижного состава [Текст] / Г.И. Колпахчян, В. И. Захаров // *Электровозостроение: сб. научн. тр / ОАО "Всерос. н.-и. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения" (ОАО "ВЭЛНИИ")*. – Т.45 – Новочеркасск, 2001. – с.62-67.
4. Щербаков, В. Г. Применение реактивных индукторных двигателей на перспективном ЭПС [Текст] / В. Г. Щербаков, Г. И. Колпахчян, Б. И. Хоменко // *Электровозостроение: сб. научн. тр / ОАО "Всерос. н.-и. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения" (ОАО "ВЭЛНИИ")*. – Т.40 – Новочеркасск, 2001. – с.45-57.
5. Бочаров, В. И. Тяговые электродвигатели электровозов [Текст] / В. И. Бочаров, В. И. Захаров, Л. Ф. Коломейцев ; под ред. В. Г. Щербакова – Новочеркасск : Агенство Наутилус, 1998. – с. 672.
6. Иванов-Смоленский, А. В. Универсальный метод расчёта электромагнитных процессов в электрических машинах [Текст] / А. В. Иванов-Смоленский, Ю. В. Абрамкин, А. И. Власов, В. А. Кузнецов ; под ред. А. В. Иванова-Смоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – с. 216. : ил.
7. Птах, Г. К. Развитие методов расчёта электромагнитных процессов в электромеханических системах с индукторными машинами [Текст] : Монография / Г.К. Птах. – Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск : Ред. журн. "Изв. вузов. Электромеханика", 2003. – с. 232
8. <http://femm.berlios.de>
9. Демирчян, К. С.. Моделирование и машинный расчет электрических цепей [Текст] : учеб. пособие для электр. и электротенерг. спец. вузов / К.С. Демирчян, П. А. Бутырин. – М. : Высш. шк., 1988. – с. 335. : ил.
10. Дьяконов, В. П. Simulink 4. Специальный справочник [Текст] / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2001. – с. 553.
11. Кетков, Ю. Л. Matlab 7 [Текст] : Численные методы / Ю. Л. Кетков, А. Ю. Кетков, М. М. Шульц. – СПб. : Бхв-Петербург, 2005. – с. 752. : ил.

Поступила 27.08.2009

*Любарский Борис Григорьевич*, к.т.н.,  
*Рябов Евгений Сергеевич*,  
*Оверьянова Лилия Владимировна*  
 Национальный технический университет  
 "Харьковский политехнический институт"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",  
 кафедра электрического транспорта и тепловозостроения  
 тел. (057) 707-65-30, e-mail: lboris@kpi.kharkov.ua

*Емельянов Вадим Леонидович*  
 Национальный технический университет  
 "Харьковский политехнический институт"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",  
 кафедра электрических аппаратов  
 тел. (057) 707-68-64, e-mail: evl@kpi.kharkov.ua

# Abstracts

## **ELECTROENGINEERING: Prominent events and great names**

*Baranov M.I.*

### **Electrons and Earth civilization.**

The fundamental role of elementary electric charge carriers, electrons, in formation and devel-

- 3 opment of Earth civilization is shown from scientific and technical and historical points of view.

*Key words* – elementary electric charge, electron, Earth civilization.

## **Electrical Mashines and Apparatus**

*Baida E.I.*

### **Mathematical modeling of electromechanical systems.**

The paper considers a problem of mathematical modeling of complicated electromechanical systems with current computer programs. As an example, a mathematical model of an induction dynamic mechanism without a magnetic core and with a ferromagnetic core is analyzed. Quantitative and qualitative estimations of obtained results are given.

*Key words* – complicated electromechanical systems, mathematical modeling, current computer programs, quantitative and qualitative estimations.

*Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Rassokha M.O., Shchukin I.S.*

### **Experimental and theoretical research on an impact inductive electric motor with various inductors.**

Experimental and theoretical research on six different impact inductive electric motor inductors excited by a polar capacitive storage is conducted. Mechanisms of the inductor main parameters influence on electrical, mechanical and thermal characteristics at various operating motor modes are revealed. The inductor efficiency work rating is performed. Experiment results and mathematical model numerical solutions are compared.

*Key words* – inductive electric motor, inductor, current density, projectile velocity.

*Kohanovsky V.O.*

### **Research on electric erosion resistance of contact points with enhanced environmental safety.**

Results of research into electric erosion of the contact material environmental safety of which is enhanced due to excluding toxic cadmium oxide

- 13 from standard contact material are given. Electric erosion resistance of the developed contacts is 1.6 times as high compared with KMK-A10m-type contacts.

*Key words* – electric erosion resistance, contact points, enhanced environmental safety.

*Milykh V.I., Maistrenko A.M.*

### **A three-phase asynchronous motor mathematical model for a virtual research bench and its practical realization.**

A three-phase asynchronous motor mathematical model and its realization algorithm for a virtual research bench have been considered. A principal schematic and graphical model of the research bench is shown, performance characteristic of the motor placed in the virtual laboratory has been obtained.

*Key words* – virtual reality, virtual reality hardware, electric machine, asynchronous motor, mathematical model, virtual laboratory, virtual reality toolkit.

*Shulzhenko N.G., Pantelyat M.G., Rudenko E.K., Saphonov A.N.*

### **Calculation of 3D stationary magnetic fields by finite element method.**

A method for finite element analysis of stationary 3D magnetic fields in turbogenerators and other electrical engineering equipment is described. Results of test problems solution are analyzed, credibility of numerical results for particular cases is considered. Results of calculation of stationary magnetic field spatial distribution on different finite element meshes for simplified schemes of a synchronous turbogenerator rotor are presented.

*Key words* – stationary 3D electromagnetic fields, electrical machines, finite element method

- 17

- 25

## **Electrical Engineering: Theory**

*Shinkarenko V.F., Zagirnyak M.V., Shvedchikova I.A.*

### **Macrogenetic analysis and rank structure of magnetic separators systematics.**

Species diversity of magnetic separators functional class has been systemized. Quantitative composition and genetic information of implicit species forming innovation potential of the ana-

- 40 lyzed class have been determined. Rank structure of the basic systematic units has been proposed. Possibilities of practical application of obtained results have been demonstrated.

*Key words* – systematics, genetic code, generating structure, primary field source, rank structure, basic species.

28

33

*Baranov M.I.*

**Estimation of electroerosive wear of massive homogeneous metallic electrodes of high-voltage heavy-current spark air switchboards of atmospheric pressure.**

Results of approximate calculated quantitative estimation of material mass ejected for one spark and specific electric wear are obtained for massive steel electrodes-anodes of high-voltage spark air switchboards of atmospheric pressure under action of heavy pulse decaying sine-wave currents of microsecond time span.

*Keywords* – heavy-current high-voltage spark air switchboards, massive steel electrodes-anodes, electroerosive wear.

*Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Zarochetsev A.I., Ivanov V.M.*

**Development of Conceptions on Trigatron Operation Mechanisms and Their Rational Design.**

In the paper, on the basis of results of literature analysis, development of conceptions about trigatron breakdown mechanisms is shown. Special attention is devoted to trigatron breakdown delay time  $t_3$  and its spread  $\Delta t_3$ .

*Key words* – trigatron, operation mechanism, operation-delay time, operation time spread, control pulse, parallel connection of trigatrons.

*Bondina N.N., Mikhailov V.M.*

**Approximation of pulse conductance of a thin solenoid – external conducting shell system.**

An approximate formula is derived to calculate pulse conductance of a thin solenoid – external conducting shell system. The approximation is

44 based on the assumption that current distribution across the thickness of the shell is uniform. Evaluation of the approximation errors is made in terms of analysis and calculations.

*Key words* – solenoid – external conducting shell system, pulse conductance.

*Gnatov A.V.*

59

**Calculation of electromagnetic processes in an induction inductor system with a massive screen of finite thickness.**

The article is dedicated to calculating the main characteristics of an induction inductor system of rectangular geometry with a non-ferromagnetic massive screen and a sheet work-piece for a low-frequency regime. Some analytical dependencies for induced currents and electrical dynamical forces excited as attracting as repelling ones are obtained. A quality analysis shows the integral action of the attracting forces during time has a cumulative character, while the repelling forces integral action aspires to zero.

*Key words* – induction inductor system, massive screen of finite thickness, non-ferromagnetic sheet thin-walled work-piece.

*Petkov A.A.*

63

**Formation of a test voltage impulse on capacitive load.**

In the work, formation of a test voltage impulse on capacitive load with utilization of a formative two-terminal device is considered. Materials for selection of the formative two-terminal device structure and its elements values are presented.

*Key words* – digit circuits, test device, voltage pulse, structure.

56

## Electric Transport

*Lubarsky B.G., Ryabov E.S., Overianova L.V., Emeljanov V.L.*

67

**A simulation model of a traction valve inductor electric drive.**

The paper presents a simulation model of a traction valve inductor electric drive that allows for geometric parameters of the inductor motor and its power supply and control system.

*Key words* – traction valve inductor electric drive, geometric parameters, simulation model.