



---

***Електротехніка і Електроомеханіка***

***Электротехника и Электромеханика***

***Electrical engineering & Electromechanics***

---

**2007'3**



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

**EIE**

**Науково-практичний журнал**

**2007'3**

**Держвидання**

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

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

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

*Головний редактор*

**Клименко Б.В.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків

*Члени редколегії*

**Баранов М.І.** д.т.н., начальник відділу НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків

**Батигін Ю.В.** д.т.н., професор кафедри вищої математики НТУ "ХПІ", Харків

**Босв В.М.** д.т.н., професор кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ "ХПІ", Харків

**Болюх В.Ф.** д.т.н., професор кафедри загальної електротехніки НТУ "ХПІ", Харків

**Буткевич О.Ф.** д.т.н., професор, головний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ

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

**Гончаров Ю.П.** д.т.н., професор кафедри промислової та біомедичної електроніки НТУ "ХПІ", Харків

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

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

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

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

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

**Лупіков В.С.** д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних апаратів НТУ "ХПІ", Харків

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

**Михайлов В.М.** д.т.н., професор кафедри інженерної електрофізики НТУ "ХПІ", Харків

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Сосков А.Г.** д.т.н., професор, завідувач кафедри електротехніки ХНАМГ, Харків

**Ткачук В.І.** д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин і апаратів НУ "Львівська політехніка", Львів

**Шинкаренко В.Ф.** д.т.н., професор, завідувач кафедри електромеханіки НТУУ "КПІ", Київ

**Юферов В.Б.** д.т.н., начальник відділу ННЦ ХФТІ, Харків

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ**

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

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

# ЗМІСТ

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

<b>Баранов М.И.</b>	Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики и ядерной энергетики	<b>5</b>
---------------------	--	----------

## ***Електричні машини та апарати***

<b>Бібік О.В., Попович О.М.</b>	Підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу в квазістатичних режимах роботи	<b>12</b>
<b>Бранспиз М.Ю.</b>	К постановке оптимизационной задачи для одновитковой обмотки	<b>15</b>
<b>Васьковський Ю.М., Гайдено Ю.А., Нацик О.В.</b>	Дослідження методами теорії поля характеристик асинхронних двигунів при несиметрії параметрів ротора	<b>19</b>
<b>Жаворонков М.А., Ткаченко С.А.</b>	Диагностика текущей работоспособности электромеханических коммутационных аппаратов	<b>23</b>
<b>Заблодский Н.Н.</b>	Взаимодействие шнекового электротепломеханического преобразователя и нагрузочно-охлаждающей среды	<b>25</b>
<b>Клименко Б.В.</b>	Міжнародний електротехнічний словник: українські перспективи	<b>29</b>
<b>Конохов Н.Н.</b>	Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин	<b>36</b>
<b>Мороз В.І.</b>	Інтегральні рівняння в моделюванні керованих електромеханічних систем	<b>39</b>
<b>Павленко Т.П.</b>	Влияние активации на износ электрических контактов	<b>44</b>
<b>Поляков М.А.</b>	Нечеткий регулятор охлаждения силового масляного трансформатора на основе прогноза изменения возмущающих факторов	<b>47</b>
<b>Попович О.М., Головань І.В.</b>	Дослідження асинхронних двигунів з масивним феромагнітним ротором при підвищеній частоті живлення	<b>51</b>
<b>Розанов Ю.К., Крюков К.В.</b>	Регулятор потока мощности с использованием фотоэлектрического преобразователя	<b>55</b>
<b>Себко В.В.</b>	Исследование переходного процесса нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием при изменении температуры нагревателя по периодическому закону	<b>57</b>
<b>Шумилов Ю.А., Пономаренко В.К., Кузьмин В.В., Демидюк Б.М.</b>	Обеспечение надёжности электрогенераторов на АЭС, ГЭС и ТЭС	<b>61</b>
<b>Шуруб Ю.В.</b>	Покращення експлуатаційних властивостей трифазно-однофазних асинхронних електроприводів в пускових режимах	<b>64</b>

## Теоретична електротехніка

Бранспиз Ю.А.	Анализ мысленного опыта Эйнштейна по определению составляющей силы магнитного поля на ток в ферромагнитном проводнике	66
Горбачев М.Н.	Геометрическое моделирование периодических негармонических энергетических процессов в управляемых радиотехнических цепях и системах	69
Пелевин Д.Е.	Определение исходных данных для электромагнитных устройств управления магнитным полем в помещениях	72

## Зміст освіти за напрямками підготовки "Електротехніка" і "Електромеханіка"

Годжелло А.Г., Жаворонков М.А., Калашникова А.В., Нечаев Д.Н.	Создание универсального учебного стенда для исследования аппаратов низкого напряжения	77
--	---	----

<b>Список авторів</b>	79
-----------------------	----

<b>Abstracts</b>	80
------------------	----

<b>Вимоги</b> до оформлення статей і інформаційних матеріалів у науково-практичному журналі "Електротехніка і електромеханіка"	82
--	----

## ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

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

## ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

*Постановою Президії ВАК України від 15.01.03 № 1-08/5 науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.*

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

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

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

## **ЭНРИКО ФЕРМИ – ОДИН ИЗ ОСНОВОПОЛОЖНИКОВ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ, ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт"

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

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

*Наведено короткий науково-історичний нарис про основні здійснення і відкриття у фізичній науці й атомній техніці видатного фізика ХХ століття Енріко Фермі.*

*Приведен краткий научно-исторический очерк об основных свершениях и открытиях в физической науке и атомной технике выдающегося физика ХХ века Эрико Ферми.*

*Окончание. Начало в №2007'2*

### **4. НЬЮ-ЙОРСКИЙ ПЕРИОД ПРЕПОДАВАНИЯ ФЕРМИ И РАБОТЫ В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

Вот в такой бурной внешней "ядерной" обстановке начиналась новая для Э. Ферми жизнь в американской иммиграции. Известно, что эта иммиграция для него была вынужденной мерой: фашистский режим Италии стал угрожать благополучию его семьи из-за еврейского происхождения его жены Лауры [1, 11]. Купив дом в пригороде Нью-Йорка, семья Э. Ферми стала потихоньку приобщаться к американской культуре и американскому образу жизни. Из воспоминаний Э. Сегре [1]: "...Я не знал другого взрослого иммигранта, который бы столь же серьезно, как и Ферми, старался американизироваться". Заметим, что Э. Ферми американское гражданство получил в июле 1944 года (в минимальный срок, предусмотренный законом США). В Колумбийском университете Э. Ферми с 1939 года со свойственной ему энергией принялся за преподавание студентам физики, включая специальный курс геофизики. Как бы не нравилось ему быть педагогом и учителем студентов, все же главным для него "делом жизни" оставалась научно-исследовательская работа.

Проанализировав полученные европейскими учеными опытные данные по "делению" урана нейтронами, он пришел к тому выводу, что, наверное, при достаточном числе "вторичных" нейтронов, испущенных осколками "деления", в уране может начаться цепная реакция [1, 11]. Напомним, что в физике под такой (цепной) ядерной реакцией понимается та, которая связана с "делением" тяжелых атомных ядер нейтронами и при которой вновь рождающиеся нейтроны поддерживают рассматриваемый процесс "деления" [11, 13]. Сейчас дополнительно известно, что цепные ядерные реакции для тяжелых химических элементов сопровождаются выделением огромного количества энергии. А тогда человечество делало только первые шаги к освоению этой ядерной энергии и многое было неизвестным. Перед ним (Э. Ферми) сразу встали вопросы: Как можно эти качественные рассуждения перевести в реальные факты? Какими могут оказаться

технические последствия цепной реакции в уране? Во всех крупнейших физических лабораториях мира с начала 1939 года повторялись и совершенствовались фундаментальные эксперименты по "делению" урана. Вскоре физиками-ядерщиками были получены количественные данные по "вторичным" нейтронам, рождающимся в результате расщепления урана. Были открыты и "запаздывающие" нейтроны при "делении" урана. Согласно современным данным при каждом акте "деления", например, изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , сопровождающимся выделением в среднем энергии в 197 МэВ, высвобождается в среднем  $\nu=2,47$  "быстрых" нейтрона из-за относительного избытка нейтронов у тяжелых ядер по сравнению с ядрами со средними значениями массового числа  $A$  [9, 11]. Заметим, что в недалеком прошлом ХХ века долгие годы в период "холодной войны" и гонки ядерных вооружений численное значение числа  $\nu$  было строго закрытым во всех ядерных державах мира. В этом случае большинство нейтронов испускается практически мгновенно (за время менее  $10^{-14}$  с), а весьма малая часть нейтронов (примерно 0,75% от всех "вторичных" нейтронов) испускается с запаздыванием (с задержкой от 0,05 до 60 с) [9]. Именно эти-то нейтроны и получили название "запаздывающих" нейтронов. Дальнейшие ядерные исследования показали, что благодаря именно этим "запаздывающим" нейтронам цепная ядерная реакция "деления" изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  может быть стать управляемой [9, 11].

С 1939 года в США для работ над цепной ядерной реакцией и выяснением количественной информации о "вторичных" нейтронах стали работать две основные группы ученых – группа Э. Ферми и группа Лео Сциларда (парадоксально, но факт, что оба они были иммигрантами: первый – из Италии, а второй – из Венгрии) [1]. Одной из основных причин, по которым на начальном этапе овладения в США ядерной энергией в работу оказались по преимуществу вовлеченными физики-иммигранты, было то, что главные американские менеджеры научных исследований оборонного значения мало верили в эту сложную затею "яйцеголовых" (так в

Америке в шутку называли ученых) и свое предпочтение они отдавали разработке отечественного радара (радиолокационной станции) [1]. Поэтому основная часть финансов и лучшие американские "мозги" направлялись в Линкольновскую лабораторию Массачусетского технологического института, где тогда велись работы над созданием радара [1]. По мнению Э. Ферми у них тогда было два пути практической военной реализации цепной ядерной реакции (получения нового взрывчатого вещества огромной разрушающей силы): *первый путь*, связанный с разделением изотопов урана  $^{238}_{92}\text{U}$  и  $^{235}_{92}\text{U}$  и накоплением таким физико-техническим приемом в достаточных количествах металлического изотопа урана  $^{235}_{92}\text{U}$ , делящегося под действием "медленных" нейтронов [1,9]; *второй путь*, связанный с осуществлением управляемой цепной ядерной реакции в природном уране  $^{238}_{92}\text{U}$ , делящегося под действием "быстрых" нейтронов и обеспечивающего получение в конце цепочки ядерных превращений нового радиоактивного стабильного изотопа плутоний  $^{239}_{94}\text{Pu}$  [1, 9]. Накопление таким вторым путем в требуемом количестве металлического изотопа плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$ , который может делиться под действием "медленных" нейтронов, означало бы получение ядерной взрывчатки и соответственно получение делящегося радиоактивного материала для ядерной бомбы [1, 9]. Э. Ферми был сторонником второго пути. В первый путь он тогда сам мало верил из-за технической сложности сепарации (от лат. *separatio* – разделение на составные части [13]) указанных выше изотопов урана, незначительно отличающихся по массовому числу  $A$  и соответственно по атомной массе [1]. К лету 1939 года в Колумбийском университете указанными группами физиков было установлено следующее [1]: а) В природном уране образуется больше "быстрых" нейтронов, чем поглощается (это является необходимым условием для цепной ядерной реакции); б) Резонансное поглощение этих нейтронов в уране оказывает сильное влияние на соотношение числа "быстрых" и "медленных" (тепловых) нейтронов; в) Для уменьшения в уране влияния резонансного поглощения "быстрых" нейтронов и снижения числа их потерь на это поглощение необходимо в замедлителе нейтронов использовать блочное расположение металлического урана; г) Поглощение тепловых ("медленных") нейтронов в водяном замедлителе нейтронов слишком велико и ее (воды) использование в качестве необходимой для обеспечения цепной реакции среды, замедляющей образующиеся в природном уране (в смеси изотопов  $^{238}_{92}\text{U}$  и  $^{235}_{92}\text{U}$ ) "быстрые" нейтроны до состояния "медленных" нейтронов, было практически невозможно. Несколько забегаая вперед и нарушая хронологию событий, отметим, что к лету 1940 года колумбийскими исследователями ядерных процессов (группами Э. Ферми и Л. Сциларда), вызванных

действием нейтронов, было установлено, что наиболее перспективным замедлителем "быстрых" нейтронов является относительно дешевый и сравнительно легко получаемый углерод в форме графита [1].

2 августа 1939 года великий физик А. Эйнштейн подписал подготовленное обеспокоенным Л. Сцилардом (последнего просто пугали последствия создания Германией первой нового вида оружия – ядерной бомбы) известное письмо на имя Президента США Франклина Рузвельта, в котором с учетом полученных научными группами Э Ферми и Л. Сциларда результатов и проводимых в нацистской Германии аналогичных работ по урану предлагалось американскому правительству взять под особый контроль урановую проблему с целью достижения в ней в ближайшем будущем успехов и овладения США первыми в мире ядерной энергией. Обсуждение в Белом доме с участием Президента США Ф.Д. Рузвельта данной проблемы, состоявшееся лишь 11 октября 1939 года, привело к созданию в США Уранового комитета под эгидой правительственных учреждений [1]. Это привело к заметной активизации и интенсификации в США работ по дальнейшему изучению ядерных свойств урана, закупке металлического урана и замедлителя "быстрых" нейтронов – графита [1].

В начале 1941 года в США в радиационной лаборатории (г. Беркли), директором которой был упомянутый выше нами известный американский физик Э.О. Лоуренс, сотрудниками группы Э. Ферми были начаты работы по длительному облучению "быстрыми" нейтронами на имевшемся в ней 60-дюймовом (с диаметром полюсов электромагнита примерно в 1,5 м) циклотроне изотопа урана  $^{238}_{92}\text{U}$  и наработке таким путем металлического изотопа плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  с последующими количественными опытными измерениями его свойств на "деление" тепловыми ("медленными") нейтронами [1]. После решения американскими учеными нелегкой задачи химического разделения образующихся при этом радиоактивных элементов изотопа нептуния  $^{239}_{93}\text{Np}$  и изотопа плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  ими было однозначно установлено: изотоп плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  действительно может служить эффективной ядерной взрывчатой [1, 11]. Теперь перед физиками США открывался более ли менее ясный путь для создания ядерной бомбы: получение в требуемом количестве изотопа плутония-239 с помощью управляемого ядерного устройства (реактора), но при наличии одного существенного условия: при возможной практической реализации такого дорогостоящего реактора промышленных масштабов. 6 декабря 1941 года (прямо накануне нападения японцев на основную часть Тихоокеанского американского флота в Пирл-Харборе и прямого вступления США во Вторую мировую войну) по решению Уранового комитета во главе всех научных исследований США, связанных с цепной ядерной реакцией и сооружением ядерного

реактора для этих целей, был поставлен американский физик Артур Комптон (лауреат Нобелевской премии по физике 1927 года [1]), профессор физики Чикагского университета [1]. В январе 1942 года им все исследователи, в том числе и указанные ранее научные группы из Колумбийского университета, были переведены в г. Чикаго во вновь созданную крупную организацию под названием Металлургическая лаборатория. США начали собирать свои интеллектуальные и производственные силы, а также технологические мощности в "кулак" перед активным научно-техническим штурмом урановой проблемы.

#### 5. ЧИКАГСКИЙ ПЕРИОД РАБОТЫ ФЕРМИ В АТОМНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

Чикагская Металлургическая лаборатория стала заниматься не только работами над ядерным реактором на "медленных" нейтронах, но и радиационной химией, ядерной технологией, радиационной безопасностью и другими сложными вопросами атомной науки и техники [1]. Колумбийские группы Э. Ферми и Л. Сциларда в этой огромной закрытой фирме были лишь маленькими песчинками. В мае 1942 года Э. Ферми вместе со своей семьей поселился в г. Чикаго, считая, что этот переезд является делом временным (после окончания в сентябре 1945 года войны он так здесь и остался до конца своей жизни). Летом 1942 года Урановый проект (так в США был назван комплекс работ по созданию ядерной бомбы) был передан в ведение американской армии [1]. Сразу же был организован Манхэттенский инженерный округ, командующим которого был назначен бригадный генерал Лесли Гровс (перед своим назначением имел чин полковника и значительный строительный опыт). Дальнейшие события показали, что этот выбор командующего оказался правильным. Вот отзыв о нем Э. Сегре [1]: *"...Генерал Гровс не был интеллигентом, но был умным, энергичным, решительным и преданным своему делу человеком"*. А вот одно из высказываний административного руководителя Уранового проекта, взятое из его доклада и касающееся "военного" юмора генерала Л.Р. Гровса [1]: *"...Я раньше не имел опыта общения с учеными – этими дороговатыми чокнутыми котелками"*. Через несколько месяцев после назначения на свою ответственную должность он научился обращению и общению с этими учеными во имя достижения великой научной и военной цели. Перед всеми участниками Уранового проекта (в том числе и перед Э. Ферми) стояла срочная и колоссальная по своим масштабам задача: надо было воплотить положительные лабораторные результаты ядерных исследований на микроскопических количествах радиоактивных материалов в крупные промышленные установки и мощную взаимосвязанную технологическую цепочку десятков оборонных предприятий страны. Такая работа в нормальной обстановке, наверное, заняла бы не один десяток лет. Но шла Вторая мировая война и фашисты Германии всеми силами рвались к новому виду оружия

невероятной разрушительной силы – к "оружию возмездия". Поэтому в США строительство заводов по производству оружейного изотопа плутония-239 и изотопа урана-235 и необходимых для этого основных (сопутствующих) материалов, устройств и приспособлений было начато немедленно осенью 1942 года [1].

#### 4. Создание уран-графитового ядерного реактора.

Комплекс работ по созданию в США первого в мире ядерного реактора на природном уране, обеспечивающего протекание управляемой цепной ядерной реакции, является четвертым наиболее крупным вкладом Э. Ферми в атомную науку и технику. К октябрю 1942 года в США были успешно решены многие как производственные, так и технологические задачи, связанные с обеспечением физиков в требуемом объеме особо чистыми материалами: графитом, окисью урана и металлическим природным ураном [1]. Производственное помещение на Аргоннской площадке под ядерный реактор к этому времени готово еще не было. Тогда Э. Ферми предложил А.Х. Комптону монтировать этот опытный реактор под западной трибуной стадиона Чикагского университета, находящегося в самом центре большого города. Взвесив все аргументы "за" и "против", научный и административный руководители Уранового (Манхэттенского) проекта (А.Х. Комптон и Л.Р. Гровс) согласились с этим предложением Э. Ферми, отвечавшего за создание опытного уран-графитового ядерного реактора.

В ноябре 1942 года началось сооружение данного ядерного реактора. Огромную помощь Э. Ферми в его создании оказали работавшие с ним канадский физик Уолтер Зинн и американский физик Герберт Андерсон [1]. Работа по монтажу элементов реактора шла круглосуточно. В начале этот ядерный реактор (на англ. *"pile"*, а на русском – "котел") был запроектирован в виде начиненной блоками графита и природного урана ячеистой сферы радиусом 4 м с деревянной опорной конструкцией. В процессе сооружения реактора удалось уменьшить его размеры и первоначально задуманную геометрическую форму реактора свести к форме эллипсоида вращения (за счет опережающей поставки на монтажную площадку металлического урана), полярный по вертикали радиус которого был равен 3,09 м, а экваториальный по горизонтали – 3,88 м [1]. На сооружение данного чикагского уран-графитового ядерного реактора ушло [1]: около 46 тонн природного урана, в том числе 6 тонн металлического урана (основная часть урана была использована в виде блоков черного цвета из окиси урана  $UO_2$ , каждый из которых был примерно весом 2 кг); около 385 тонн графита особо высокой чистоты (как нам всем хорошо известно, тоже черного цвета). Причем, согласно данным вышеуказанного американского литературного источника максимальные линейные размеры отдельной ячейки уран-графитовой "решетки", предусмотренной для размещения в ней радиоактивного материала, составляли около 0,21 м. Металлический уран

располагали в этих ячейках как можно ближе к центру ядерного котла и физики тщательно следили за качеством укладки каждого радиального слоя ячеистой структуры реактора (они уже на основе своего колумбийского опыта четко знали, что от этого может существенно измениться один из важнейших параметров реактора, его коэффициент размножения нейтронов  $k_p$  – реактивность ядерного котла). Данный коэффициент  $k_p$  равен отношению количества нейтронов в одном последующем поколении к их количеству в предыдущем поколении [9]. Э. Ферми знал, что при  $k_p < 1$  цепная ядерная реакция в рассматриваемом котле будет затухать (гаснуть), при  $k_p = 1$  эта реакция будет идти стационарно (этот режим цепной реакции в ядерной физике называется критическим [9]), а при  $k_p > 1$  – лавинообразно взрывообразно развиваться (в последнем случае число новых последующих актов "деления" ядер радиоактивного материала будет значительно больше числа старых предыдущих актов их "деления"). Для исключения паразитного поглощения нейтронов в окружающем уран-графитовые блоки воздухе и уверенного достижения критичности реактора ( $k_p = 1$ ) последний был окружен огромной резиновой оболочкой, внутри которой, в случае необходимости, можно было создать вакуум. В конечном счете, при испытаниях созданного реактора оказалось, что в создании внутри его уран-графитовой "решетки" вакуума нет необходимости. Всего в чикагский ядерный реактор друг за другом было радиально уложено 57 слоев уран-графитовых блоков. Кроме того, для управления процессом "деления" ядер изотопа урана-235 в создаваемом атомном (ядерном) котле были предусмотрены управляющие кадмиевые стержни. Так как химический элемент кадмий  $^{112}_{48}Cd$  сильно поглощает нейтроны, то в реакторе (ядерном котле) Э. Ферми такие перемещающиеся от периферии к центру реактора стержни надежно выполняли роль "ловушек" нейтронов, уменьшая тем самым в нем значения указанного выше коэффициента размножения нейтронов  $k_p$ .

Ежедневно в период сборки чикагского реактора управляющие кадмиевые стержни на определенное ограниченное время выводили из ядерного котла и физики экспериментально определяли достигнутую им реактивность (численное значение коэффициента  $k_p$ ). 2 декабря 1942 года в 14 часов 20 минут по местному времени при очередном проведении под руководством Э. Ферми испытаний созданный в г. Чикаго ядерный реактор был доведен до критического состояния (коэффициент размножения в нем нейтронов оказался практически равным  $k_p = 1$  и цепная ядерная реакция в котле стала самоподдерживающейся) [1]. Первый цикл испытаний этого уран-графитового ядерного реактора согласно [1] продолжался лишь в течение 28 минут при его мощности всего в 0,5 ватта (для обеспечения

минимального радиоактивного излучения от реактора и соответственно минимального облучения участников его испытаний). Впоследствии данный реактор был демонтирован и перевезен в Аргоннскую лабораторию (вблизи г. Чикаго), где он долго использовался для научных целей (его мощность достигала 100 кВт при непрерывной работе не более двух часов) [10]. Создание в США этого уран-графитового ядерного реактора стало важной исторической вехой на магистральном пути промышленного производства человечеством в недалеком будущем ядерной энергии и становлении новой отрасли – ядерной энергетики. Успешный ядерный эксперимент 2 декабря 1942 года явился для американских физиков серьезным шагом вперед и в вопросе возможного создания ядерного оружия.

В начале 1943 года в США перед физиками-участниками и руководителями Уранового проекта на повестку дня стала новая важная стратегическая военная задача: как только возможно быстро первыми в мире создать оружие на основе использования ядерной энергии и как технически сделать эту ядерную бомбу при наличии требуемого количества металлического изотопа плутония  $^{239}_{94}Pu$  или металлического изотопа урана  $^{235}_{92}U$ . Ясна была сначала лишь общая идея создания такой невиданной по своим боевым характеристикам бомбы [1]: требуется быстрое создание и дальнейшее удержание критической (сверхкритической) массы делящегося радиоактивного материала, что может привести к цепной ядерной реакции взрывного типа. Эта идея для нас требует своего пояснения. Начнем с того, что в ядерной физике среду, в которой происходит цепная ядерная реакция "деления", называют "активной зоной". В связи с конечным объемом этой зоны и возможностью "ухода" нейтронов "деления" за ее пределы и были введены новые понятия в ядерной физике: понятие "критической массы" и понятие "критического размера" делящегося материала и соответственно "активной зоны" [9]. Поэтому под критическим размером "активной зоны" понимается ее геометрический размер, при котором выполняется вышеуказанное условие критического режима протекания цепной ядерной реакции "деления" ( $k_p = 1$ ). Тогда соответственно под "критической массой" понимается масса "активной зоны", имеющая критические размеры. Согласно современным данным "критическая масса" зависит как от вида делящегося радиоактивного изотопа, так и от внешних окружающих этот изотоп условий [9]. Так, для самого изотопа урана  $^{235}_{92}U$  "критическая масса" равна 50 кг [9], а для "активной зоны" из этого изотопа, снабженной тонкими полиэтиленовыми прокладками и помещенной в отражающую оболочку из бериллия  $^9_4Be$ , "критическая масса" составляет всего 0,242 кг [9]. В 1943 году об этих ядерных подробностях (важных деталях) американские физики-ядерщики безусловно еще не знали и поэтому в вопросах путей сосредоточения и удержания такой "критической



массы" делящегося "медленными" нейтронами радиоактивного материала, а также в ряде других сложных технических вопросах у них тогда ясности еще не было. Для выяснения этих путей предстояла большая работа. В этот период в США для получения фундаментальных ядерных данных, необходимых для проектирования и монтажа атомной бомбы, в рамках организационной структуры Уранового проекта на высокогорном плато (на высоте примерно 2200 м) была создана знаменитая Лос-аламосская лаборатория (штат Нью-Мексико), руководителем которой генерал Л.Р. Гровс назначил американского физика Дж.Р. Оппенгеймера, профессора теоретической физики Калифорнийского университета (ему тогда было 39 лет).

#### 6. ЛОС–АЛАМОССКИЙ ПЕРИОД РАБОТЫ ФЕРМИ НАД УРАНОВЫМ ПРОЕКТОМ

В середине лета 1943 года Лос-аламосская лаборатория начала проводить совершенно неизведанные для физиков-ядерщиков реальные научные, технические и технологические работы, направленные на дальнейшее детальное изучение ядерных свойств изотопов плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  и урана  $^{235}_{92}\text{U}$  и выработку предложений по конструированию неведомой доселе ядерной бомбы [1]. Э. Ферми в этой лаборатории возглавил отдел перспективных ядерных исследований (всего в лаборатории было семь научных отделов). Основная часть ученых Лос-аламосской лаборатории сосредоточила свои усилия на возможных методах собирания "критической массы" новой бомбы (в частности, на методе "выстреливания" одной части "критической массы" в другую и методе "имплозии" [1]). Э. Ферми был рад своей работе в этой лаборатории, которая могла приблизить победоносное завершение Второй мировой войны. Ему нравилось быть научным консультантом (чем-то вроде оракула) для всех отделов лаборатории. Летом 1944 года Дж.Р. Оппенгеймер назначил Э. Ферми своим заместителем и поручил ему и его новому отделу *F*, кроме работ по ядерной бомбе, еще и часть работ по проекту водородной бомбы. Работы по последнему проекту были в самом начале нелегкого пути и всем было очевидно, что для их успешного завершения потребуется не один год напряженных исследований. Секретные же на тогда работы в Лос-аламосской лаборатории по созданию атомной бомбы на базе использования в ее "активной зоне" изотопа плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  и усовершенствованного метода "имплозии" подходили к своему логическому завершению. Реальное испытание созданной США бомбы должно было стать апогеем и одновременно апофеозом военных усилий этой лаборатории. Этому испытанию было присвоено кодовое наименование "Тринити" (троица) [1]. Для его осуществления была выбрана пустынная местность неподалеку от Аламогордо (в 300 км к югу от г. Лос-Аламоса) [1]. Э. Ферми принял непосредственное активное участие в этом ядерном испытании, занимаясь подготовкой и проведением

многочисленных измерений различных физических параметров, присущих взрыву ядерной бомбы (например, энергии светового потока, проникающей радиации от гамма-лучей, нейтронов, воздушной ударной волны и др.). Несмотря на то, что цель испытания "Тринити" была устрашающей (зловещей), этот ядерный эксперимент при его успешном завершении должен был стать одним из величайших физических экспериментов всех времен и народов. 16 июля 1945 года в 5 часов 30 минут утра первая на нашей планете американская атомная бомба, размещенная над землей на верхушке стальной башни, была успешно взорвана. Примерно через час после ядерного взрыва Э. Ферми, одев защитный костюм и захватив с собою радиометр, на танке со специальной защитой от проникающей радиации направился в эпицентр ядерного взрыва (эта зона его поразила характером расплавления песка, образовавшего на большой площади стекловидную массу) для сбора радиоактивных образцов с целью их анализа на продукты ядерного "деления". Позже стало известно, что время ее (бомбы) взрыва американцами было приурочено к началу в этот день в немецком г. Потсдаме послевоенной международной конференции с участием главы Советского государства И.В. Сталина (прибыл на переговоры с опозданием на один день), президента США Г. Трумэна и премьер-министра Великобритании У. Черчилля [16]. В это время в СССР под научным руководством профессора физики И.В. Курчатова (будущего академика и трижды Героя Труда) активно разворачивались работы по атомной проблеме, курировать которые поручили руководителю специальной силовой структуры Л.П. Берии. США и Великобритания таким приемом пытались добиться от СССР определенных уступок при делении «плодов» великой Победы в Европе и организации нового расклада политических сил в мире. Судя по имеющимся историческим данным, это сделанное 24 июля 1945 года устное сообщение президента США должного влияния на советскую делегацию на Потсдамских переговорах не произвело и союзники-соперники ничего существенного для себя от СССР не добились [16]. Они не знали, что в этот же вечер в г. Москву от И.В. Сталина ушла шифровка о "необходимости предельного ускорения работ по атомной проблеме" [16].

Успех испытания "Тринити" превзошел самые оптимистические ожидания физиков США (энергия взрыва оказалась вблизи максимальных предсказаний и оценок). Участников этих испытаний и авторов разработки плутониевой ядерной бомбы, понимающих, что произошло экстраординарное событие исторической важности, переполняло чувство удовлетворения от выполненного ими гражданского долга и гордости. Научный и трудовой подвиг ученых, впервые овладевших колоссальной ядерной энергией, навсегда останется в истории человечества одним из ярких свидетельств могущества Человека. Вместе с тем у участников создания первой ядерной бомбы возросла и озабоченность за последствия овладения атомной энергией. Для приближения конца войны ряд

ведущих физиков-ядерщиков США (в том числе, к сожалению, и Э. Ферми) рекомендовали американскому правительству в качестве меры устрашения применить против своего военного противника Японии атомное оружие. Но в действительности же не они предопределили трагическую судьбу японских городов Хиросимы и Нагасаки. По политическим соображениям сделано это было Пентагоном и правящими кругами США: они пытались показать СССР перед его вступлением 9 августа 1945 года в войну против Японии свои "козыри" и монопольное право на сверхоружие. К этому стоит добавить то, что на комплекс работ по созданию атомного оружия по состоянию на 9 августа 1945 года США затратили почти два миллиарда долларов [1]. Нужно было продемонстрировать и американскому народу то, куда пошли такие огромные денежные средства от налогоплательщиков.

Заканчивая этот интересный с научной и малоизвестный нам с исторической стороны раздел очерка, следует подчеркнуть одну существенную деталь в методологии проведения ученым-физиком Э. Ферми научно-исследовательских работ: там, где это возможно, разработчиком новой техники и технологии требуется защищать свои права на интеллектуальную собственность. Выполняя специальные работы в области ядерной физики, Э. Ферми и его коллеги умудрялись получать в Патентном ведомстве США открытые патенты на изобретения в области атомной техники, связанные, в основном, с ядерными реакторами [17-26]. Сложившаяся обстановка в США и местные американские юридические тонкости вынудили его и соавторов этих американских изобретений отказаться от денежной компенсации их патентных прав и безвозмездно передать права на эти патенты государству. В разделе 3 очерка мы уже раньше указывали об одном из важных изобретений Э. Ферми и его итальянских коллег, связанного с обеспечением эффективного протекания ядерных реакций в веществе за счет "медленных" нейтронов. Речь идет об итальянском патенте №324458 на "*Способ получения радиоактивных веществ путем их облучения нейтронами*", получившем в дальнейшем международное юридическое признание (в том числе, и в США). В связи с тем, что это изобретение было достаточно широко внедрено в действующих конструкциях ядерных реакторов США итальянскими соавторами этого патента был предъявлен иск правительству США на компенсацию их прав в 10 миллионов долларов. После многолетних судебных слушаний было достигнуто соглашение и США было вынуждено летом 1953 года выплатить авторам этого изобретения (Э. Ферми в том числе) денежную компенсацию в размере около 400 тысяч долларов (после уплаты налогов доля каждого изобретателя составила примерно 24 тысячи долларов США) [1].

## 7. НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ РАБОТА ФЕРМИ ПОСЛЕ СОЗДАНИЯ США АТОМНОГО ОРУЖИЯ

После окончания Второй мировой войны в связи с нерешенностью в Лос-аламосской лаборатории вопроса об организации исследований по атомной энергии Э. Ферми для себя принял решение о собственной "демобилизации". Э. Ферми отказался от предложенного ему поста директора ядерного института, созданного осенью 1945 года на базе Чикагского университета. На этот пост он предложил своего коллегу по работам в г. Лос-Аламосе американского физика Самуэля Аллисона, ставшего, как показали дальнейшие события, великолепным руководителем. В шуточной форме, характеризуя свою работу, однажды новый директор заметил [1]: "*...Его задача опекать, лелеять и улаживать интеллектуалов*". Таким путем Э. Ферми освободил себя от административных забот. Он занял должность профессора в этом институте и одновременно в Чикагском университете с окладом 15 тысяч долларов в год. К 1951 году жалование Э. Ферми было постепенно увеличено до 20 тысяч долларов в год (на то время это были большие деньги). В этот период Э. Ферми принял активное участие в выработке закона США об атомной энергии. 1 августа 1946 года президент США Г. Трумэн подписал Акт об атомной энергии, который до сих пор является основным законом об атомной энергии в США [1]. В организованную согласно этому закону Комиссию по атомной энергии США был включен и Э. Ферми (как член ее Генерального консультативного комитета на срок с 1 января 1947 года по 1 августа 1950 года). Эта его основная тогда государственная служба и подготовка к заседаниям комитета (раз в два месяца в г. Вашингтоне), определяющего стратегию развития атомной промышленности, сооружения ускорителей элементарных частиц, создания новых и модернизации существующих ядерных вооружений и развития ядерной энергетики США, отбирали у Э. Ферми достаточно много времени. Работая параллельно в Чикагском университете, Э. Ферми после выполнения своих педагогических дел (он читал студентам термодинамику, ядерную физику, физику твердого тела и квантовую механику) в своих "свободных временных окнах" вновь мог использовать ядерные реакторы Аргоннской лаборатории для проведения экспериментов. В течение 1947-1948 годов он вместе с физиком Леоной Маршалл опубликовал серию статей по экспериментальному изучению когерентного и некогерентного рассеяния нейтронов: например, "*Фаза рассеяния нейтронов*"; "*Интерференционные явления при рассеянии медленных нейтронов*"; "*Фаза рассеяния тепловых нейтронов на алюминии и стронции*"; "*О взаимодействии между нейтронами и электронами*" и др. В этот период Э. Ферми вплотную занялся физикой элементарных частиц с высокими энергиями. Он исследовал, в основном, свойства мезонов (неустойчивых положительно или отрицательно заряженных частиц с массой, находящейся между массами электрона и протона) [1, 10]. Из наиболее известных работ Э. Ферми в эти

годы следует отметить разработанную им статистическую теорию ускорения частиц в космических лучах (1949 год), а также теорию множественного образования мезонов при соударении частиц, которые обладают очень высокими энергиями (1950 год) [10]. В 1953 году Э. Ферми совместно со своими коллегами по Чикагскому институту ядерных исследований были проведены фундаментальные экспериментальные исследования взаимодействия мезонов и нуклонов, а также по пион – нуклонному рассеянию [1, 10]. В 1954 году Э. Ферми неожиданно заболел (обследование установило наличие у него в желудке злокачественной опухоли). До последнего момента он сохранял невиданную смелость, силу духа и ясность мысли [1]. Умер Э. Ферми 29 ноября 1954 года и был похоронен в г. Чикаго.

\* \* \*

Энрико Ферми являлся ярким представителем физики XX столетия, удачно сочетавшим в себе глубокие теоретические знания с талантом первоклассного экспериментатора. Это был универсальный физик мирового масштаба: он внес крупный научный вклад в развитие теоретической и экспериментальной физики, астрономии, ядерной, технической и нейтронной физики, а также в становление ядерной энергетики мирного и военного назначения. Хорошо знавший Энрико Ферми, лауреат Нобелевской премии по физике 1959 года, известный итальянский физик-экспериментатор Э. Сегре, вспоминая о своем учителе, в конце прошлого века отметил [1]: "...Э. Ферми отдал науке все, что было в его силах, и с ним от нас ушел последний наш современник, который достиг высочайших вершин как в теории, так и в эксперименте и которому была подвластна вся физика".

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сегре Э. Энрико Ферми – физик / Пер. с англ. под ред. академика Б.М. Потекорво.- М.: Мир, 1973.- 324 с.
- [2] Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина.- М.: Мир, 1982.-520 с.
- [3] Fermi E. The Collected Papers.- Chicago, vol.1, 1962.- 414 p.
- [4] Ферми Э. Научные труды.- М.: т.1, 1971.- 415 с.
- [5] Schrödinger E. Quantisierung als Eigenwertproblem// Annalen der Physik.-1926.-№79.-S.489-527; 1926.-№79.-S.734-757; 1926.-№80.-S.437-491; 1926.-№81.-S. 109-140.
- [6] Fermi E. The Collected Papers. - Chicago, vol.2, 1965.- 355 p.
- [7] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990.- 624 с.
- [8] Баранов М.И. Эрвин Шредингер и новые пути развития физической науки микромира // Электротехника і електромеханіка.-2006.- №4.- С. 5-15.
- [9] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.-864с.
- [10] Выдающиеся физики мира. Рекомендательный указатель.- М.: Типография б-ки им. В.И. Ленина, 1958.- 435 с.
- [11] Кудрявцев П.С. Курс истории физики.- М.: Просвещение, 1974.- 312 с.

- [12] Вигнер Е. Этюды о симметрии.- М.: Мир, 1971.- 199 с.
- [13] Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. - М.: Русские словари, 2004. - 957 с.
- [14] Астафуров В.И., Бусев А.И. Стрoение вещества.- М.: Просвещение, 1977.- 160 с.
- [15] Frish O. Niels Bohr.-New York, S. Rozental, 1967.- p.137.
- [16] Волкогонов Д.А. Триумф и трагедия / Политический портрет И.В. Сталина.- М.: Новости (АПН), кн. 2, 1990.- 688 с.
- [17] Патент США №2708656. Нейтронный реактор / Ферми Э., Сцилард Л.
- [18] Патент США №2768134. Испытание материалов в нейтронном реакторе / Ферми Э., Андерсен Г.
- [19] Патент США №2780595. Экспоненциальный котел / Ферми Э.
- [20] Патент США №2807727. Защита нейтронного реактора/ Ферми Э., Зинн У.
- [21] Патент США №2837477. Система цепной реакции / Ферми Э., ЛEVERETT М.К.
- [22] Патент США №2836554. Нейтронный реактор, охлаждаемый воздухом/ Ферми Э., Сцилард Л.
- [23] Патент США №2813070. Метод испытания нейтронной системы на цепной реакции/ Ферми Э., ЛEVERETT М.К.
- [24] Патент США №2807581. Нейтронный реактор/ Ферми Э., Сцилард Л.
- [25] Патент США №2852461. Нейтронный реактор/ Ферми Э., Зинн У.
- [26] Патент США №2931762. Нейтронный реактор / Ферми Э.

Поступила 29.01.2007

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В КВАЗІСТАТИЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Бібік О.В., к.т.н., Попович О.М., к.т.н.  
 Інститут електродинаміки НАН України  
 Україна, 03680, Київ, пр-кт Перемоги, 56  
 тел. (044) 454-25-43

*Запропоновано алгоритм визначення резервів покращення експлуатаційних показників при проектуванні асинхронних двигунів з урахуванням реального режиму роботи.*

*Предложен алгоритм определения резервов повышения эксплуатационных показателей при проектировании асинхронных двигателей с учетом реального режима работы.*

Асинхронні двигуни (АД) мають достатньо високі значення енергетичних коефіцієнтів у номінальних режимах роботи, що досягається оптимальним проектуванням для даних умов. На практиці режим роботи АД може істотно відрізнятись від номінального. При цьому енергоефективність значно знижується. На прикладі навантажень, досліджених у роботі [1], коефіцієнти корисної дії (ККД) і потужності ( $\alpha$ ) знижуються відповідно: для періодичного навантаження (типу поршневого компресора) на 37% і 17.5% у порівнянні з номінальними, для пульсуючої - на 21.5% і 12.5%. Резерви підвищення енергоефективності АД полягають в урахуванні реального режиму експлуатації в процесі оптимального проектування.

Метою даної роботи є підтвердження можливості підвищення енергоефективності і кількісне визначення резерву підвищення ККД асинхронних двигунів на конкретному прикладі експлуатації. Алгоритм визначення резервів підвищення експлуатаційних показників АД припускає:

1. Вибір цільової функції.
2. Еквівалентування заданого змінного навантаження еквівалентним сталим.
3. Пошук оптимальних параметрів АД при сталому режимі роботи з еквівалентним постійним навантаженням (статичний режим).
4. Пошук оптимальних конструктивних параметрів АД при квазістатичному режимі роботи з заданим змінним навантаженням, що було еквівалентоване сталим в п.2, і визначення при цьому максимального експлуатаційного ККД.
5. Дослідження АД з конструктивними параметрами, отриманими по п.3, у заданому квазісталому режимі роботи і визначення одержуваного при цьому значення ККД.
6. Визначення резервів підвищення енергоефективності в зіставленні експлуатаційних ККД, одержуваних по п.4 і п.5.

Визначення оптимальних параметрів АД виконано на базі трифазного асинхронного двигуна 4А80А6У3 (номінальна потужність  $P_n = 750$  Вт, число пар полюсів  $p = 3$ , момент інерції ротора двигуна  $J_p = 0,0031$  кг·м<sup>2</sup>) за критерієм максимуму ККД при пульсуючому навантаженні і живленні симетричною трифазною напругою в статичному і квазістатичному

режимах.

Як цільову функцію обраний коефіцієнт корисної дії, що розраховується як:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (1)$$

де  $P_1 = \sum_{k=1}^3 \frac{1}{T_H} \int_t^{t+T_H} u_k(t) \cdot i_k(t) dt + P_{ст}$  – споживана потужність;

$P_2 = \frac{1}{T_H} \int_t^{t+T_H} M(t) \cdot \omega_r(t) dt$  – корисна потужність;

$P_{ст}$  – втрати в сталі;  $M(t)$ ,  $\omega_r(t)$  – миттєві значення електромагнітного моменту і частоти обертання ротора;  $T_H$  – період навантаження;  $k$  – число фаз.

У якості еквівалентного змінного навантаження  $M_{сз}$  прийнятий середній момент  $M_{ссп}$  за період зміни моменту навантаження  $T_H$ :

$$M_{сз} = M_{ссп} = \frac{1}{T_H} \int_t^{t+T_H} M_c(t) dt, \quad (2)$$

де  $M_c(t)$  - часова залежність моменту опору.

Для виключення впливу сторонніх факторів, розрахунок робочих характеристик АД і здійснення процедури оптимального проектування виконані на одній і тій же математичній моделі, тим самим методом, як у статичному так і в квазістатичному режимах [1, 2]. Алгоритм розрахунку реалізований у системі Matlab-Simulink. Необхідно помітити, що метод оптимізації повинний забезпечити ефективний пошук оптимального варіанта в умовах значних витрат машинного часу, що має місце при дослідженні квазістатичних режимів роботи (повторюваних перехідних процесів).

Пошук оптимального варіанта АД поділено на два етапи: одержання аналітичної залежності зміни ККД у функції параметрів оптимізації й оптимізацію отриманої залежності. На першому етапі застосований метод планування експерименту МПЕ [3], в основі якого лежить побудова регресійної моделі. Використано ортогональний центрально-композиційний план другого порядку (ОЦКП), що забезпечує незалежність визначення коефіцієнтів регресії, достатню точність моделі і потребує порівняно невеликої

кількості експериментів.

Рівняння регресії в цьому випадку має вид

$$\hat{Y} = f(\bar{x}) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (3)$$

де  $\hat{Y}$  – значення вихідної величини;  $x_i, x_j$  – значення змінних параметрів (факторів);  $n$  – число факторів;  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – оцінки коефіцієнтів рівняння регресії, що визначаються рішенням системи лінійних рівнянь у матричній формі:

$$\hat{Y} = [f^T(x)] \cdot [B], \quad (4)$$

де  $[f^T(x)]$  – транспонована матриця,  $[B]$  – матриця оцінок коефіцієнтів. У результаті математичних викладень [3], отримане однорідне лінійне рівняння, рішенням якого є наступне:

$$[B] = \left( [x^T] \cdot [x] \right)^{-1} \cdot [x^T] \cdot [\hat{Y}], \quad (5)$$

де  $[x]$  – прямокутна матриця значень, що спостерігаються;  $\hat{Y}$  – матриця-стовпець вихідних змінних.

В ортогональному плані ОЦКП до ядра, що представляє повний факторний експеримент (ПФЕ) типу  $2^n$ , додається центральна точка ( $x_i = 0, i = 1, 2, \dots, n$ ) і по дві "зоряні" точки для кожного фактора ( $x_i = \pm \alpha, x_j = 0, j \neq i$ ). Загальне число дослідів у даному плані складає:  $N = 2^n + 2n + 1$ .

Як параметри оптимізації для представленого варіанта розрахунку обрана: довжина пакета статора  $l(x_1)$  і число ефективних провідників у пази статора  $sp_1(x_2)$ . Як середні значення прийняті конструктивні параметри досліджуваного двигуна. Інтервали варіювання змінних обрані на рівні  $\pm 10\%$  і представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

	$l, \text{ м}$	$sp_1$
Нижній рівень -1	0,702	74
Верхній рівень +1	0,0858	90
Середнє значення 0	0,078	82

Матриця планування експерименту однакова для статички і квазістатички (табл. 2).

Одержання аналітичної залежності  $\eta_1 = f(l, sp_1)$  для статичного режиму проведено за допомогою ряду розрахунків, використовуючи математичну модель квазістатички при моменті інерції  $J = \infty$ . Визначивши матрицю коефіцієнтів регресії  $[B]$  по формулі (5), вираження залежності функції мети  $\hat{Y}_1$  від параметрів оптимізації  $x_1$  і  $x_2$  для випадку статички має вид:

$$\hat{Y}_1 = 74.137 + 4.583 \cdot x_1 + 5.608 \cdot x_2 - 1.95 \cdot x_1^2 - 2.395 \cdot x_2^2 - 3.625 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (6)$$

У таблиці 2 представлені значення функції  $\hat{Y}_1$ , обчислені по поліному (6). Точність розрахунків погрішності  $\Delta_1$  визначаємо як відносну різницю між розрахунковими значеннями, отриманими по математичній моделі  $Y_1$ , і аналітичної залежності  $\hat{Y}_1$ :

$$\Delta_1 = \frac{Y_1 - \hat{Y}_1}{Y_1} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Матриця планування експерименту, розрахункові значення  $Y_1, \hat{Y}_1$ , погрішності  $\Delta_1$  представлені в табл. 2. Аналіз результатів показує, що отримана модель статички забезпечує досить високу точність розрахунків. Максимальна погрішність не перевищує 1.5%.

Для оптимізації виразу (6) використана стандартна функція оптимізації з обмеженнями `fmincon`, використовувана в середовищі Matlab [4]. У результаті розрахунків одержуємо максимальне значення ККД, рівне 77.47, у точці з координатами:  $x_1 = 0.293$ ;  $x_2 = 0.949$ , що в реальному масштабі відповідає довжині пакета статора  $l = 0.0803$  м і числу провідників  $sp_1 = 84.4$ . Позначимо цей АД (з параметрами:  $sp_1 = 84, l = 0.0803$  м) як варіант №1.

Проводимо розрахунок квазістатичного режиму з оптимальними конструктивними параметрами статички і змінним навантаженням. ККД при цьому склав 56.31%. Цей режим АД відповідає варіанту №2 у таблиці 3.

Для визначення оптимальних конструктивних параметрів квазістатичного режиму використовуємо той же підхід, що і для статички. Коефіцієнти регресійної моделі визначаємо по формулі (5), з врахуванням яких поліном має вид:

$$\eta_2 = 58.159 + 2.668 \cdot l + 0.395 \cdot sp_1 - 1.532(l^2) + 2.98(sp_1)^2 - 2.575 \cdot l \cdot sp_1. \quad (8)$$

Розрахунок погрішності  $\Delta_2$  виконаний відповідно до формули (7). Її максимальне значення не перевищує 7%. Дані розрахунків приведені в таблиці 2. У результаті оптимізації залежності (8) отримане максимальне значення функції мети  $f = 64.455$  в точці  $x = 1; -1$ , що відповідає точці 2 (див. табл. 2) з конструктивними параметрами:  $l = 0.0858$  м,  $sp_1 = 74$ . (варіант №3 табл. 3.). Варіант №4 відповідає досліджуваному (базовому) двигуну.

Таким чином, у результаті визначення залежності ККД від довжини пакета статора і числа ефективних провідників у пази обмотки статора отримані дві залежності для квазістатички (8) і статички (6). Варто помітити, що в результаті оптимізації функцій для інтервалу варіювання змінних  $\pm 10\%$  максимальний ККД статички ( $\eta_1$ ) відрізняється від ККД квазістатички ( $\eta_2$ ) на 12,3%. Виконане оптимальне проектування в квазістатичному режимі роботи дало максимум експлуатаційного ККД 64.45%.

Таблиця 2

№	$x_i$											
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x'_3 = x_1^2 - 0.67$	$x'_4 = x_2^2 - 0.67$	$x_5 = x_1 \cdot x_2$	$Y_1$	$\hat{Y}_1$	$\Delta_1, \%$	$Y_2$	$\hat{Y}_2$	$\Delta_2, \%$
1	+1	-1	-1	0.33	0.33	+1	55,38	53,976	-1,08	51,43	53,969	-4,9
2	+1	+1	-1	0.33	0.33	-1	72,0	72,392	-0,54	65,81	64,455	-2,06
3	+1	-1	+1	0.33	0.33	-1	74,75	74,442	0,41	58,52	59,909	-2,37
4	+1	+1	+1	0.33	0.33	+1	76,87	76,358	0,67	62,6	61,095	2,4
5	+1	-1	0	0.33	-0.67	0	67,89	67,604	0,42	57,89	53,959	6,79
6	+1	+1	0	0.33	-0.67	0	76,65	76,77	-0.16	55,44	59,295	-6,95
7	+1	0	-1	-0.67	0.33	0	67,12	66,134	1,47	61,94	60,744	1,93
8	+1	0	+1	-0.67	0.33	0	76,53	77,35	-1,07	60,43	61,534	-1,83
9	+1	0	0	-0.67	-0.67	0	73,74	74,137	0,22	58,07	58,159	0,15

Таблиця 3

Варіант АД	Режим АД	Параметри оптимізації		Параметри режиму								
		$l, м, (x_1)$	$sp_1, (x_2)$	$J, кг \cdot м^2$	$P_2, Вт$	$P_1, Вт$	$M_{ср}, Нм$	$s, о.е.$	$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, А$	$I_r, А$	$\alpha, о.е.$	$\eta, о.е.$
1	Статика	0.0803	84	$\infty$	364.7	477.3	3.33	0.0342	1.313, 1.313, 1.313	105	0.538	76.41
2	Квазі-статика	0.0803	84	0.0046	231.4	555.7	3.33	0.0322	1.92, 1.94, 1.905	231.4	0.429	56.31
3	Квазі-статика	0.0858	74	0.0046	325.9	495.8	3.33	0.0250	1.77, 1.765, 1.769	136.9	0.408	65.73
4	Статика (базовий варіант)	0.078	82	$\infty$	338.5	457	3.33	0.0293	1.422, 1.422, 1.422	211.1	0.42	58.07

ККД для квазістатичного режиму з конструктивними параметрами, що відповідають оптимальному статичному режиму склало 56.31 %.

Висновки. Оптимальне проектування АД з урахуванням реального навантаження забезпечує можливість підвищення енергоефективності електроприводів. У досліджуваному режимі підвищення експлуатаційного ККД склало 8.14%.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Библик Е.В., Попович А.Н., Головань И.В. Исследования квазистатических режимов асинхронного двигателя при пульсирующей и периодической нагрузках // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність", частина 2, 2006, С. 99 – 102.
- [2] Попович А.Н. Математическая модель для расчета рабочих характеристик с учетом потерь в стали // Технічна електродинаміка. - 1999. - №4. - С. 46 – 52.
- [3] Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. - М.: Энергия, 1975. - 184 с.
- [4] Кетков Ю.А., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 6х.: программирование численных методов.-СПб.: БХВ – Петербург, 2004. - 672 с.

Надійшла 18.09.2006

## К ПОСТАНОВКЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОДНОВИТКОВОЙ ОБМОТКИ

Бранспиз М.Ю.,

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

Украина, 91034, Луганск, квартал Молодежный, 20-а, ВНУ им. В. Даля, кафедра электротехники

тел. (0642) 63-66-28

*Приведено розв'язання двох задач оптимізації для електричної обмотки у вигляді одного витка. Показано, що при формулюванні задачі оптимізації електромагнітів необхідно враховувати можливі обмеження на область визначення початкових даних*

*Приведено решение двух задач оптимизации для электрической обмотки в виде одного витка. Показано, что при формулировке задачи оптимизации электромагнитов необходимо учитывать возможное ограничение на область определения исходных данных*

### ВВЕДЕНИЕ

При расчете и проектировании различных типов электрических аппаратов и других электротехнических устройств часто имеет место ситуация, когда удовлетворить каким-либо эксплуатационным требованиям можно для нескольких вариантов набора геометрических и электрических параметров устройства, в результате чего перед расчетчиком возникает задача выбора наилучшего варианта [1, 2]. В общем случае формализация этой задачи как задачи оптимизации некоторого электротехнического устройства является достаточно сложной, поскольку требует установления зависимости критерия оптимизации от параметров устройства для получения функции цели [1-3]. Сложным в общем случае является и решение соответствующей оптимизационной задачи, что приводит на практике к стремлению использования накопленного опыта в виде определенных баз данных, нерациональность которого отмечается в [2]. Но, если учесть определенную однотипность электротехнических устройств, то некоторые особенности решения оптимизационных задач для них можно установить, рассматривая их обобщенно-упрощенные варианты. В частности, для электромагнитов с осевой симметрией такой обобщенный вариант представляет собой цилиндрическую катушку с током и железо магнитной системы, которое также может быть эквивалентно представлено некоторым замкнутым током. Это дает возможность осуществлять анализ особенностей оптимизационных задач электромагнитов с осевой симметрией, используя предварительный анализ оптимизационной задачи для нескольких катушек с током, которые имеют общую ось симметрии. При этом появляется возможность введения новых аналитических соотношений для указанных электромагнитов, снижая эвристический «произвол» при проектировании, что находится в соответствии с тенденцией повышения роли теоретических рекомендаций при проектировании электромагнитов [2]. В данной работе приведены результаты анализа оптимизационной задачи для одновитковой катушки. Для этих результатов предполагается в дальнейшем их развитие на многovitковые катушки и катушки непосредственно с железом магнитной системы.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлен эскиз одновитковой обмотки с током, рассматриваемый в качестве расчетной системы, которая предназначена для создания в т. А на некотором расстоянии  $x_0$  по оси симметрии от плоскости витка магнитного поля напряженности  $H$

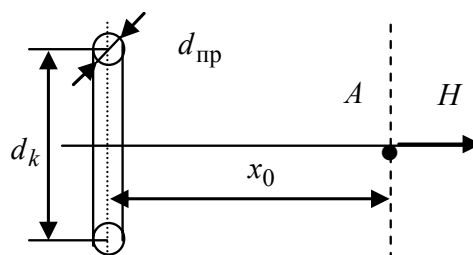


Рис. 1. Характерные геометрические размеры одновитковой обмотки

Для этой расчетной системы имеем следующие ее параметры:  $d_{\text{пр}}$  – диаметр провода витка;  $r_k$  – радиус витка по его средней линии;  $U$  – напряжение источника постоянного тока, приложенное к витку;  $i$  – постоянный ток витка;  $R_k$  – активное электрическое сопротивление витка.

Очевидно, что численные значения этих параметров не могут быть произвольными, а должны быть такими, чтобы удовлетворить уравнениям, которыми описываются физические процессы в рассматриваемой системе: распределение магнитного поля в пространстве вокруг витка; протекание тока по витку, сопровождаемое процессом нагрева и охлаждения витка. При этом из известного описания распределения магнитного поля в пространстве вокруг витка можно записать следующее уравнение для напряженности  $H$  в т. А на некотором расстоянии  $x_0$  по оси симметрии от плоскости витка [4]

$$H = \frac{1}{2} \cdot i \cdot \frac{r_k^2}{(x_0^2 + r_k^2)^{3/2}}. \quad (1)$$

Процесс же протекания тока по витку описывается уравнением закона Ома

$$i = U / R_k,$$

которое, с учетом представления сопротивления витка как сопротивления цилиндрического проводника в виде (здесь  $\rho$  – постоянное удельное сопротивление материала витка)

$$R_k = \rho \cdot \frac{2\pi \cdot r_k}{\left(\frac{\pi d_{\text{пр}}^2}{4}\right)} = 8\rho \cdot \frac{r_k}{d_{\text{пр}}^2}, \quad (2)$$

может быть записано в виде

$$i = U \cdot d_{\text{пр}}^2 / (4\rho \cdot d_k). \quad (3)$$

Что же касается процесса нагрева и охлаждения витка, то считаем, что этот процесс происходит в условиях установившегося теплового равновесия, когда количество выделившегося джоулева тепла, характеризующееся мощностью тепловыделения  $P_i = i^2 \cdot R_k$  (или  $P_i = U^2 / R_k$ ), равняется количеству тепла, отводимому с поверхности витка при охлаждении (характеризуется мощностью теплоотдачи  $P_0$ ). То есть, принимаем, что в рассматриваемом случае имеет место тепловое равновесие, описываемое равенством соответствующих мощностей

$$P_i = P_0. \quad (4)$$

Принимаем также, что мощность теплоотдачи с поверхности витка  $P_0$  может быть определена [5] как произведение  $q$  – удельная мощность теплоотдачи с единицы поверхности охлаждения, на площадь поверхности провода витка – поверхность охлаждения (равна  $2\pi^2 d_{\text{пр}} \cdot r_k$ ). Это позволяет, с учетом (2), переписать после несложных преобразований уравнение теплового равновесия (4) к следующему виду

$$i^2 \cdot 4\rho = q \cdot \pi^2 \cdot d_{\text{пр}}^3. \quad (5)$$

Таким образом, согласно тому, что изложено выше, имеем пять параметров рассматриваемой системы – одновитковая обмотка ( $d_{\text{пр}}$ ,  $r_k$ ,  $U$ ,  $i$ ,  $R_k$ ), которые связаны между собой четырьмя уравнениями (1)-(3) и (5). Это означает, что, если какой-либо один параметр из указанных будет задан, то остальные четыре параметра могут быть определены из решения уравнений (1)-(3) и (5). Эти уравнения представляющих в таком случае систему уравнений, имеющую однозначное решение (расстояние  $x_0$  и напряженность  $H$  должны быть при этом заданы).

Такая возможность произвольного задания значения какого-либо параметра и порождает ситуацию наличия некоторого множества возможных вариантов рассматриваемой системы, позволяющих создать на заданном расстоянии заданное значение напряженности. Указанной вариантности как раз можно избежать, если наложить на параметры рассматриваемой системы дополнительное условие – получение экстремума определенного критерия оптимизации. В этом случае запись критерия через параметры системы позволяет получить еще одно уравнение для параметров системы, которое и дает однозначный вариант окончательного набора значений параметров.

В частности, возможны следующие оптимизационные задачи: минимизация потребляемой энергии; минимизация веса материала витка. Их анализ и был задачей, решение которой приведено ниже.

#### СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ СВЯЗИ

Учтем, что сопротивление  $R_k$  однозначно определяется по (2) через параметры  $d_{\text{пр}}$  и  $r_k$ . Также учтем, что ток  $i$  при заданном напряжении  $U$  тоже однозначно определяется этими параметрами ( $d_{\text{пр}}$  и  $r_k$ ). Тогда, опустив уравнение (2) и подставив (3) в (1) и (5), количество уравнений (1)-(3) и (5), которыми параметры рассматриваемой системы связаны между собой, можно уменьшить до двух, уменьшив до трех и число рассматриваемых параметров. А именно, если рассматривать только параметры  $d_{\text{пр}}$ ,  $d_k$  и  $U$ , то для них можно записать в результате несложных преобразований уравнений (1) и (5), после подстановки в них  $i$  из (3), следующую систему уравнений

$$\begin{cases} H = \frac{1}{16} \cdot \frac{U}{\rho} \cdot \frac{r_k \cdot d_{\text{пр}}^2}{(x_0^2 + r_k^2)^{3/2}}; \\ \frac{U^2}{\rho} = 16 \cdot q \cdot \pi^2 \cdot \frac{r_k^2}{d_{\text{пр}}} \end{cases}, \quad (6)$$

которая является системой уравнений связи между параметрами при решении указанных оптимизационных задач.

#### ЗАДАЧА МИНИМИЗАЦИИ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Формулировка задачи: требуется определить численные значения параметров  $U$ ,  $d_{\text{пр}}$  и  $r_k$  одновитковой обмотки, которые позволяют создать на заданном расстоянии  $x_0$  по оси симметрии от плоскости витка магнитное поле напряженности  $H$  при минимуме потребляемой электроэнергии.

Поскольку потребляемая электроэнергия определяется произведением  $P = U \cdot i$ , то, учитывая соотношение (3), функцию цели для сформулированной задачи оптимизации можно представить как

$$P = \frac{U^2}{8\rho} \cdot \frac{d_{\text{пр}}^2}{r_k}. \quad (7)$$

Параметры  $U$ ,  $d_{\text{пр}}$  и  $r_k$ , позволяющие получить минимум этой функции с учетом связи этих параметров, задаваемой системой уравнений (6), и будут решением сформулированной оптимизационной задачи.

Наличие двух уравнений связи (ограничений) между тремя параметрами, входящими в функцию цели (7) означает, что эта функция цели может быть представлена как функция одного параметра (в принципе, любого из трех параметров  $U$ ,  $d_{\text{пр}}$  или  $r_k$ ).

Такая возможность представления функции цели как функции одного параметра позволяет относительно легко определить ее экстремум и решить тем самым задачу оптимизации.



С этой целью, выразив из второго уравнения в системе (6) напряжение  $U$

$$U = 4 \cdot \pi \sqrt{\rho \cdot q} \cdot \frac{r_k}{\sqrt{d_{\text{пр}}}}, \quad (8)$$

и, подставив полученное в первое уравнение этой системы, решим его относительно параметра  $d_{\text{пр}}$ , что дает соотношение

$$d_{\text{пр}} = \left( \frac{16}{\pi^2} \cdot H^2 \cdot \frac{\rho}{q} \right)^{1/3} \cdot \frac{x_0^2 + r_k^2}{r_k^{4/3}}. \quad (9)$$

В результате, подставив (8) в функцию цели (7), а затем, подставив в полученное (9), несложно получить для функции цели ее представление в виде функции одной переменной (а именно –  $r_k$ )

$$P = \left[ 2\pi^2 \cdot q^{2/3} \cdot \left( \frac{16}{\pi^2} \cdot H^2 \cdot \rho \right)^{1/3} \right] \cdot \frac{x_0^2 + r_k^2}{r_k^{1/3}}. \quad (10)$$

При этом, учитывая, что в полученном выражении (10) для функции цели множитель в квадратных скобках является постоянным для решаемой задачи, поиск минимума должен осуществляться для функции

$$f_1(r_k) = \frac{x_0^2 + r_k^2}{r_k^{1/3}}. \quad (11)$$

Используя стандартный прием (взятие производной по  $r_k$ , приравнивание ее нулю и решение полученного уравнения относительно  $r_k$ ) несложно получить, что функция (11) имеет единственный экстремум при

$$r_k = x_0 / \sqrt{5}, \quad (12)$$

и этот экстремум является минимумом.

Таким образом, приведенное решение задачи на минимизацию потребления электроэнергии одновитковой обмоткой, создающей заданное значение напряженности магнитного поля на заданном расстоянии, позволяет записать, после подстановки (12) в (9), а полученного результата – в (8), следующие соотношения для этой оптимизационной задачи

$$\begin{cases} r_k = 0.447 \cdot x_0, \\ d_{\text{пр}} = 12.057 \cdot H^{2/3} \cdot \rho^{1/3} \cdot q^{-1/3} \cdot x_0^{2/3}, \\ U = 0.7234 \cdot H^{-1/3} \cdot \rho^{1/3} \cdot q^{2/3} \cdot x_0^{2/3}. \end{cases} \quad (13)$$

#### ЗАДАЧА МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ МАТЕРИАЛА ВИТКА

Формулировка задачи: требуется определить численные значения параметров  $U$ ,  $d_{\text{пр}}$  и  $r_k$  одновитковой обмотки, которые позволяют создать на заданном расстоянии  $x_0$  по оси симметрии от плоскости витка магнитное поле напряженности  $H$  при минимальной массе витка.

Если обозначить плотность материала витка  $\gamma$ , то масса витка может быть определена как произведение  $\gamma$  на объем витка, который, очевидно, равен

$$0.25 \cdot \pi \cdot d_{\text{пр}}^2 \cdot 2\pi \cdot r_k = 0.5 \cdot \pi^2 \cdot d_{\text{пр}}^2 \cdot r_k,$$

что позволяет записать для сформулированной задачи оптимизации функцию цели в виде (здесь  $M$  – масса материала витка)

$$M = \gamma \cdot 0.5 \cdot \pi^2 \cdot d_{\text{пр}}^2 \cdot r_k. \quad (14)$$

Как и для предыдущей оптимизационной задачи, эту функцию цели можно представить как функцию одной переменной (а именно –  $r_k$ ), для чего следует подставить (9) в (14), что дает

$$M = \left[ \gamma \cdot \frac{\pi^2}{2} \cdot \left( \frac{16}{\pi^2} \cdot H^2 \cdot \frac{\rho}{q} \right)^{2/3} \right] \cdot \frac{(x_0^2 + r_k^2)^2}{r_k^{5/3}}. \quad (15)$$

Тогда, учитывая, что в (15) множитель в квадратных скобках является постоянным для решаемой задачи, получаем, что поиск минимума в данном случае должен осуществляться для функции

$$f_2(r_k) = \frac{(x_0^2 + r_k^2)^2}{r_k^{5/3}}. \quad (16)$$

Далее, используя опять стандартный прием поиска экстремума функции одной переменной, несложно получить, что функция (16) имеет единственный экстремум при  $r_k = \sqrt{\frac{5}{7}} \cdot x_0$ , и этот экстремум является тоже минимумом. Подстановка найденного значения оптимального радиуса  $r_k$  в (9), а полученного результата – в (8), позволяет записать для задачи на минимизацию массы одновитковой обмоткой, создающей заданное значение напряженности магнитного поля на заданном расстоянии, следующие соотношения

$$\begin{cases} r_k = 0.845 \cdot x_0, \\ d_{\text{пр}} = 2.521 \cdot H^{2/3} \cdot \rho^{1/3} \cdot q^{-1/3} \cdot x_0^{2/3}, \\ U = 6.685 \cdot H^{-1/3} \cdot \rho^{1/3} \cdot q^{2/3} \cdot x_0^{2/3}. \end{cases} \quad (17)$$

#### АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

Следующий ниже анализ касается ограничения на область существования полученных решений оптимизационных задач для начальных условий этих задач (расстояние  $x_0$  и напряженность  $H$ ).

Эти ограничения связаны с тем, что для рассматриваемой системы имеет место ограничение на геометрические параметры  $d_{\text{пр}}$  и  $r_k$ , связанное с геометрией витка, согласно которой всегда должно выполняться неравенство

$$2 \cdot r_k > d_{\text{пр}}. \quad (18)$$

Этому неравенству, очевидно, должны удовлетворять и полученные решения (13) и (17) рассмотренных выше оптимизационных задач.

Так, для задачи минимизации потребляемой витком электроэнергии подстановка в (18) соотношений из (13), после несложных преобразований, дает следующее неравенство

$$x_0 > \frac{5 \cdot 16 \cdot 3^3}{\pi^2} \cdot \frac{\rho}{q} \cdot H^2, \quad (19)$$

или

$$H < 0.0676 \cdot \sqrt{x_0 \cdot \frac{q}{\rho}}.$$

То есть решение указанной оптимизационной задачи является возможным, если ее исходные данные (расстояние  $x_0$  и напряженность  $H$ ) удовлетворяют неравенствам (19), которое и определяет область существования полученных решений этой задачи. А именно: если задана напряженность поля  $H$ , то первое неравенство (19) определяет допустимые значения расстояния  $x_0$ ; если же задано расстояние  $x_0$ , то второе неравенство (19) определяет допустимые значения напряженности поля  $H$ .

Аналогично, для задачи минимизации массы материала витка подстановка в (18) радиуса  $r_k$  и диаметра  $d_{пр}$  из (17), после несложных преобразований, дает неравенство

$$x_0 > \frac{32 \cdot 715}{\pi^2} \cdot \frac{\rho}{q} \cdot H^2, \quad (20)$$

или

$$H < 0.549 \cdot \sqrt{x_0 \cdot \frac{q}{\rho}}.$$

Причем, как и в предыдущем случае, неравенства (20) определяют область существования полученных решений соответствующей задачи для ее начальных условий (расстояние  $x_0$  и напряженность  $H$ ).

Согласно (19) и (20) допустимый диапазон области существования решений соответствующих оптимизационных задач определяется физическими условиями процесса протекания электрического тока (характеризуется удельным сопротивлением  $\rho$ ) и процесса отвода тепла от витка (характеризуется удельной мощностью теплоотдачи  $q$ ). В частности, чем меньше удельное сопротивление  $\rho$  и больше удельная мощность  $q$ , тем больше допустимый диапазон области существования решений рассмотренных оптимизационных задач. Практически это означает, что известная тенденция повысить теплоотдачу с поверхности электротехнических устройств позволяет не только повысить энергетические показатели этих устройств, но и дает возможность оптимизации этих показателей за счет расширения диапазона существования решений соответствующих оптимизационных задач.

В заключение заметим, что в связи с ограничением для напряженности магнитного поля как исходного параметра рассмотренных оптимизационных

задач, возникает вопрос о возможности создания одновитковой обмоткой максимума напряженности на некотором расстоянии от витка, имеющего определенные размеры. Так, например, если заданы диаметр  $d_{пр}$  и радиус  $r_k$ , то максимум напряженности будет соответствовать максимально возможному напряжению  $U$ , при котором выполняется еще условие теплового равновесия. Анализ таких и других задач, позволяющий расширить понимание оптимизационных задач для электромагнитных систем, можно рассматривать, наряду с рассмотрением многовитковых обмоток, как следующий этап развития исследований, результаты которых приведены в данной работе.

## ВЫВОДЫ

1. Электромагнитная система в виде одновитковой обмотки является такой системой, задание численного значения одного из параметров которой однозначно определяет остальные параметры, поскольку число параметров на одно больше числа уравнений, связывающих эти параметры между собой.

2. Оптимизационные задачи для электромагнитной системы в виде одновитковой обмотки сводятся к задачам на экстремум функции одной переменной.

3. Оптимизационные задачи для электромагнитной системы в виде одновитковой обмотки имеют ограничения на исходные данные, определяемые проводимостью материала витка и его способностью к теплоотдаче.

4. Интенсификация теплоотдачи электромагнитных систем дает возможность оптимизации их энергетических показателей за счет расширения диапазона существования решений соответствующих оптимизационных задач.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
- [2] Макарычев Ю.М., Рыжов С.Ю., Жидарева Т.П. Проектирование электромагнитов: этапы, методы, модели // Электричество. – 1994. – №2. – С. 46-51.
- [3] Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
- [4] Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления. Справочное пособие. – Киев: Наук. думка, 1982. – 472 с.
- [5] Теория электрических аппаратов / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, В.Л. Иванов и др.; Под ред. проф. Г.Н. Александрова. – М.: Высш. шк., 1985. – 312 с.

Поступила 30.08.2006

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ ПОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ НЕСИМЕТРІЇ ПАРАМЕТРІВ РОТОРА

Васьковський Ю.М., докт. техн. наук, Гайдено Ю.А., Нацик О.В.,  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"  
Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, корп. 20, кафедра електромеханіки  
тел. (044) 454-95-18, e-mail: ntuukafem@ua.fm

*Виконано моделювання та дослідження методами теорії поля механічних та робочих характеристик асинхронного електродвигуна в несиметричному режимі роботи при обриві стрижнів ротора. Досліджено особливості розподілу електромагнітного поля в активній зоні двигуна при наявності ушкоджених стрижнів ротора.*

*Выполнено моделирование и исследование методами теории поля механических и рабочих характеристик асинхронного электродвигателя в несимметричном режиме работы при обрыве стержней ротора. Исследованы особенности распределения электромагнитного поля в активной зоне двигателя при наличии поврежденных стержней ротора.*

### ВСТУП

Незважаючи на те, що дослідження несиметричних режимів роботи електричних машин (ЕМ) триває практично від початку їх створення і по цій проблемі опубліковано багато наукових праць, точність розрахунків параметрів і характеристик ЕМ в несиметричних режимах роботи в багатьох важливих випадках залишається незадовільною. Відомо, що несиметричні режими виникають внаслідок відхилення умов роботи машин від нормальних, скажімо через несправності в конструкції чи аварії в електромережі. В окремих випадках несиметричні режими використовуються спеціально - для отримання характеристик ЕМ з особливими властивостями.

Основними методами математичного аналізу, що і досі використовуються для розрахунку характеристик ЕМ в несиметричних режимах роботи, є методи, що ґрунтуються на лінійній теорії ЕМ. Лінійна теорія базується, як відомо, на припущенні, що електромагнітні зв'язки між обмотками ЕМ є лінійними, тобто магнітні потокозчеплення обмоток лінійно (пропорційно) залежать від їх струмів. Прийняття такого припущення дозволяє при аналізі машин широко використовувати принцип суперпозиції. Тому основним методом дослідження несиметричних режимів роботи ЕМ і досі залишається метод симетричних складових, що також ґрунтується на принципі суперпозиції. Проте експериментальні випробування і досвід експлуатації показують, що відхилення характеристик електричних машин в несиметричних режимах роботи від розрахованих за методом симетричних складових є надзвичайно значними (для деяких випадків відхилення по струму або електромагнітному моменту може сягати кількох разів). Таким чином, існуючі методи розрахунку характеристик ЕМ в несиметричних режимах роботи не задовольняють сучасні вимоги до достовірності результатів математичного моделювання характеристик ЕМ, що особливо важливо на етапі їх проектування.

Альтернативним підходом до розрахунку ЕМ в несиметричних режимах є безпосередній розрахунок характеристик машин за результатами аналізу їх електромагнітного поля. Польовий підхід дозволяє не тільки врахувати складну геометрію активної зони

машини, розподіл струмів по пазах статора і ротора, але й строго врахувати нелінійність властивостей матеріалів і тому взагалі не потребує використання принципу суперпозиції.

В попередніх роботах авторів польовий метод аналізу був використаний для розрахунку характеристик тягових асинхронних двигунів, що працюють в умовах несиметрії напруги живлення обмотки статора. Було доведено, що при цьому виді несиметричного режиму роботи польовий метод аналізу дозволяє отримати більш точні і достовірні результати моделювання.

Метою запропонованої статті є розробка методів та алгоритмів польового аналізу для дослідження іншого виду несиметричних режимів роботи короткозамкнених асинхронних двигунів (АД), що викликані несиметрією конструкції обмотки ротора. В статті також зроблена порівняльна оцінка розрахункових результатів, отриманих польовим методом і методом симетричних складових.

На практиці, при експлуатації асинхронних двигунів досить часто трапляються випадки виходу із ладу або порушення нормальної роботи двигунів через обрив стрижнів короткозамкненої обмотки ротора. Найчастіше це трапляється з двигунами, що працюють на електротранспорті [3] та в інших складних умовах експлуатації. Обрив стрижнів викликає несиметрію розподілу струмів в стрижнях ротора, що призводить до перегріву двигуна, появи паразитних моментів, погіршення віброакустичних показників тощо. Це призводить до перебоїв в роботі обладнання електровозів, виробничих ліній та різноманітного устаткування. Тому правильний і точний розрахунок характеристик АД при наявності несиметрії ротора є надзвичайно важливим як на етапі проектування, так і для подальшої експлуатації електродвигунів.

За об'єкт дослідження було обрано серійний АД з короткозамкненим ротором 4А180М4У3 потужністю 25 кВт, фазною напругою 220 В, синхронною частотою обертання 1500 об/хв. Двигун має 48 пазів на статорі і 38 на роторі.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ

Математична модель та методика розрахунку характеристик АД докладно викладена в роботах [1, 2, 4]. Зупинимось на особливостях польових розрахунків характеристик АД при обриві стрижнів короткозамкненої обмотки ротора. Як відомо, після формування конфігурації розрахункової області у відповідних підобластях (пазах статора) задається густина струму (джерело поля) та фізичні властивості матеріалів в усіх підобластях, з яких складається розрахункова область. Розглянемо, яким чином можливо врахувати наявність обірваних стрижнів ротора. Нехай два стрижня ротора АД типу 4A180M4У3 під номерами 3 і 4 обірвані. Задамо в цілих стрижнях (36 пазів ротора з усіх 38) електропровідність матеріалу, що дорівнює електропровідності алюмінію  $\sigma = \sigma_{Al}$ , а в останніх 2-ох (№3 і №4), що залишилися, задамо  $\sigma = 0$ . Далі за алгоритмом, створюємо сітку скінченних елементів і проводимо розрахунок поля. Головною відмінністю розрахунку поля при несиметрії ротора є необхідність вести розрахунок по всіх трьох фазах статора. Це пов'язано з тим, що при обриві стрижнів обмотки ротора у повітряному проміжку машини виникає еліптичне магнітне поле, яке призводить до несиметрії ЕРС фаз обмотки статора. У таких випадках дещо збільшується процесорний час, потрібний для розрахунку та аналізу характеристик двигуна. Після розрахунку поля знаходяться характеристики АД за методикою, яка описана в [1, 2, 4].

Сітка скінченних елементів (рис. 1) нараховує 117700 елементів і відповідно 59063 вузла, причому щільність елементів в пазах ротора значно більше ніж в інших областях АД через необхідність точнішого врахування ефекту витіснення струму.

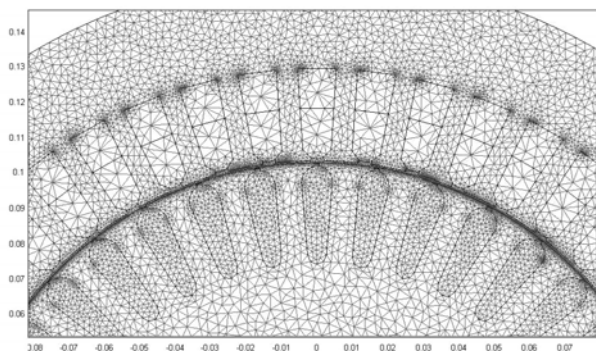


Рис. 1. Сітка скінченних елементів 4A180M4У3

### РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Згідно з розробленою методикою знаходимо розподіл векторного магнітного потенціалу. Для порівняння наведемо розподіл ізоліній векторного магнітного потенціалу АД в номінальному режимі при симетричному роторі (рис. 2а) та при обриві двох стрижнів (рис. 2б). Як видно з рисунків, при обриві стрижнів значно підвищується щільність силових ліній в зубцях, розташованих біля ушкодженої ділянки. Це спричиняє значне підвищення магнітної індукції в зубцях і зниження  $\cos \phi$ .

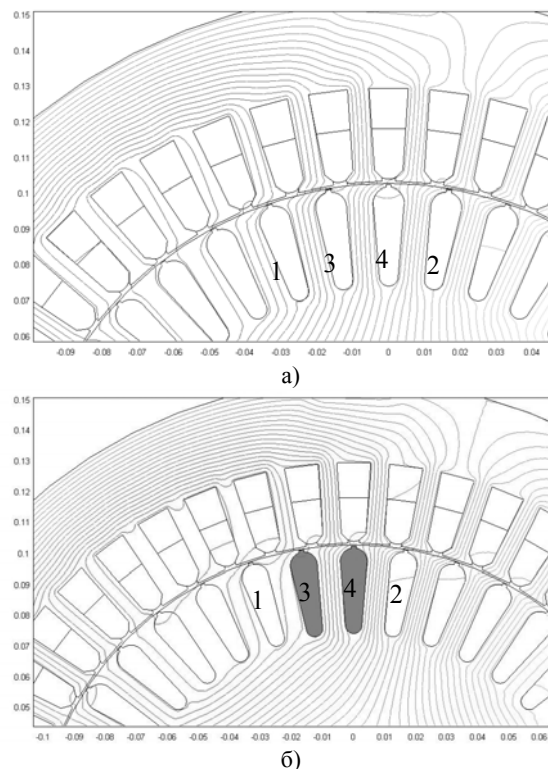


Рис. 2. Розподіл векторного магнітного потенціалу АД в номінальному режимі

На рис. 3 приведені картини розподілу магнітної індукції для номінального режиму в зубцово-пазовій зоні двигуна, причому рисунок а) відповідає симетричному режиму, а б) – несиметричному.

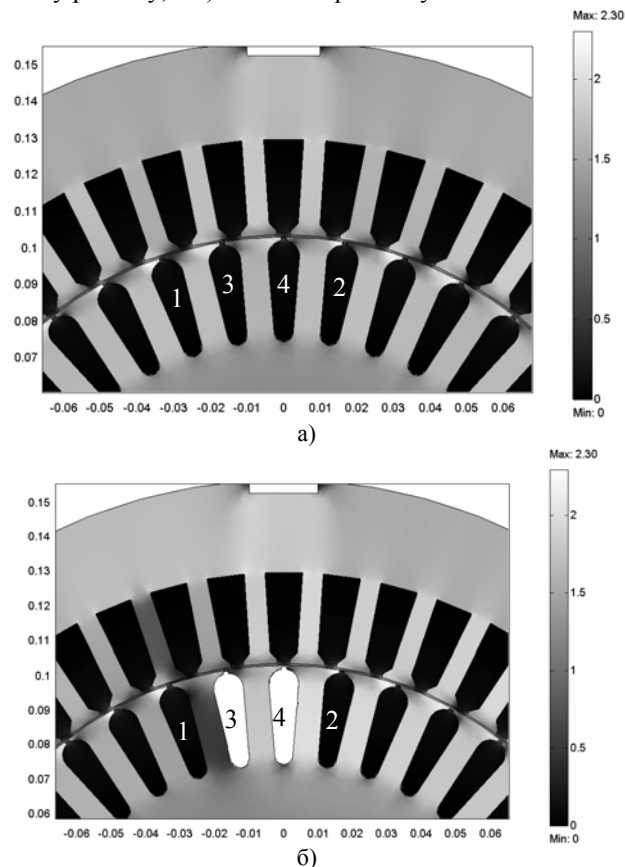


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції АД в номінальному режимі

Аналізуючи розподіли векторного магнітного потенціалу (рис. 2) і магнітної індукції (рис. 3) можна чітко відзначити суттєву деформацію магнітного поля в порівнянні з симетричним режимом. Зокрема в районі пазів ротора 2, 3, 4 спостерігається значне ущільнення силових ліній векторного магнітного потенціалу і, отже, істотного (більше ніж на 15%) збільшення магнітної індукції. Разом з тим в зубці між пазами 1 і 3 індукція зменшилася на 60%. На рисунку також можна побачити значне деформування магнітного поля і в магнітопроводі статора, що у свою чергу викликає нерівномірність розподілу потокозчеплень і ЕРС фаз статора.

Обрив двох стрижнів обмотки ротора і пов'язане з цим деформування магнітного поля викликає нерівномірність розподілу густини струму в стрижнях обмотки ротора машини. На рис. 4а зображено розподіл струмів при симетричному режимі АД, на рис. 4б – при обриві двох стрижнів ротора. Так густина струму в 3-му пазу ротора зростає на 35%, в 4-му – на 20%, що викликає значне (25 - 70%) збільшення, пропорційних квадрату струму електричних втрат у вказаних стрижнях. Крім того, пошкодження стрижнів ротора викликає пульсацію і несиметрію струмів в обмотці статора. Так у фазі статора, яка у даний момент часу знаходиться навпроти пошкодженої ділянки струм зменшується приблизно на 20% в порівнянні з іншими фазами.

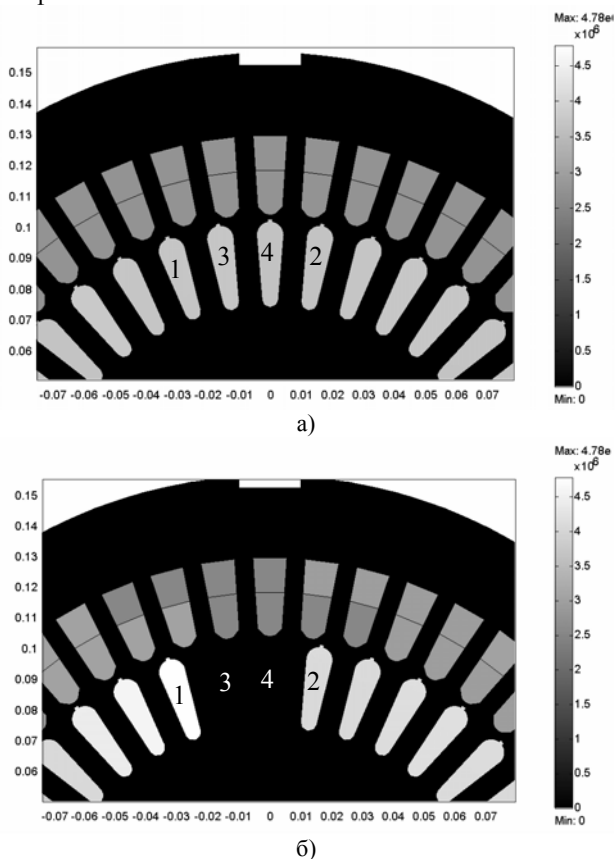


Рис. 4. Розподіл густини струмів в пазах статора і ротора АД в номінальному режимі

На рис. 5а і 5б показано розподіл векторного магнітного потенціалу при пуску – при ковзанні  $s=1$ .

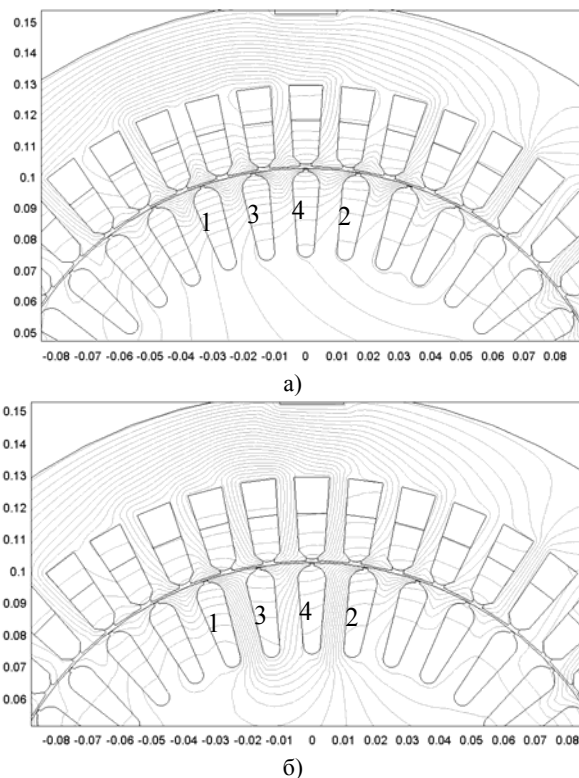


Рис. 5. Розподіл векторного магнітного потенціалу АД при пуску

На рис. 6 приведені механічні характеристики досліджуваного АД, який працює в несиметричному режимі в умовах відсутності двох стрижнів ротора (пунктирна лінія) і, для порівняння, механічні характеристики при симетричному режимі (суцільна лінія).

З графіків видно, що при обриві стрижнів при тій же потужності  $P2$  зростають струми в обмотках машини, зокрема в обмотці статора струм  $I1$ . До того ж амплітуди струмів в окремих фазах пульсують на 20-30%. Це приводить до таких небажаних ефектів, як пульсації моменту і "гойдання" ротора.

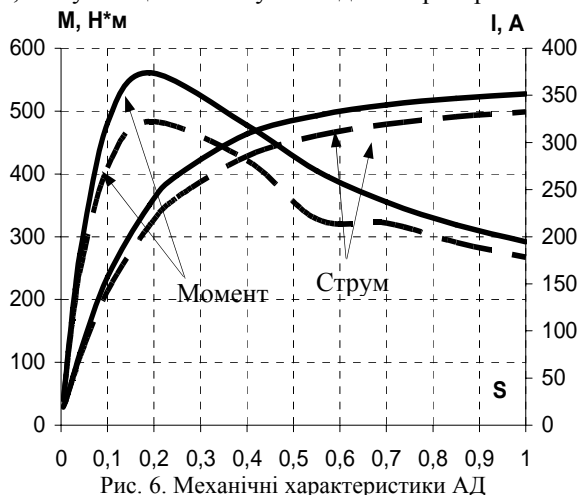


Рис. 6. Механічні характеристики АД

Ці чинники обумовлюють збільшення втрат і зниження ККД. Причому електричні втрати зростають в результаті збільшення струму, а втрати в сталі – через додаткових пульсацій магнітного потоку і значного зростання індукції в окремих частинах машини. Що

стосується  $\cos \phi$ , то він також знижується в результаті зростання реактивної потужності і втрат в сталі.

Польовий аналіз дозволяє також розрахувати електричні втрати в стрижнях ротора. В табл. 1 приведено збільшення електричних втрат в стрижнях №1 і №2 та загалом в обмотці ротора відносно показників симетричного режиму.

Таблиця 1

	Рст 1, в.о.	Рст 2, в.о.	Рел2
$P$ (несим. при $P2=25$ кВт)	1,65	1,25	1,10
$P_{п}$ (несим. при пуску)	2,59	2,54	0,95

З таблиці 1 видно, що втрати в стрижнях, які знаходяться в безпосередній близькості від ушкодженої ділянки, зростають приблизно в 1,3-2,5 рази, причому більше значення відповідає режиму пуску двигуна, а менше – номінальному режиму роботи. Разом з тим, нагрів в цих стрижнях збільшується на 150-160%. Тому, для збереження подальшої працездатності машини необхідно уникати частих пусків, особливо під навантаженням. Використання ж ушкодженого АД в реверсивному режимі взагалі неприпустимо, оскільки, навіть при реверсі без навантаження втрати і нагрів ротора значно перевищуватимуть допустимі і до того ж, при реверсі, час знаходження машини в перехідному режимі значно збільшується.

Як видно з рис.6 механічні характеристики АД при несиметрії ротора мають незначний провал при ковзанні  $s=0,5$ , що цілком відповідає теоретичним уявам щодо особливостей вигляду механічних характеристик АД в несиметричних режимах роботи при несиметричній конструкції ротора. Незначна величина провалу у даному випадку пов'язана з тим, що два зруйнованих стрижня складають незначну частку від загальної кількості стрижнів ротора (38). При збільшенні їх кількості провал механічної характеристики також збільшується.

Польовий аналіз є універсальним та дозволяє розрахувати характеристики АД і у випадках більш складної та комбінованої руйнації обмотки ротора, наприклад при обриві кількох стрижнів, що лежать в різних місцях клітки ротора.

## ВИСНОВКИ

1. Традиційний метод аналізу несиметричних режимів роботи АД, що базується на використанні принципу суперпозиції, не забезпечує необхідної точності розрахунків характеристик АД, особливо при аналізі несиметричних режимів, пов'язаних з несиметричністю конструкції короткозамкненої обмотки ротора. На протигагу методу симетричних складових польовий метод аналізу забезпечує високу достовірність результатів, оскільки дозволяє строго врахувати не тільки складну конфігурацію активної зони АД, але й нелінійність фізичних характеристик конструктивних матеріалів.

2. Наслідком обриву стрижнів є значна деформація магнітного поля, що призводить до надмірного на-

сичення окремих ділянок магнітопроводу, спотворення кривої ЕРС, а також до зниження  $\cos \phi$  і ККД.

3. В стрижнях, що знаходяться поруч з ушкодженими значно збільшуються електричні втрати та нагрів. Це призводить до подальшої лавиноподібної руйнації стрижнів ротора, що межують з ушкодженою ділянкою, до повної зупинки ротора. Крім того, при поступовому виходу з ладу стрижнів збільшується і ступінь несиметрії, що призводить до додаткового навантаження на обмотку статора. Таким чином недоцільно використовувати АД з обірваними стрижнями, навіть якщо їх кількість незначна.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Васьковский Ю.Н., Гайденко Ю.А., Цьвинский С.С. Определение интегральных характеристик электрических машин методами теории электромагнитного поля // "Электротехника і електромеханіка", №1, 2006, С. 28 – 32.
- [2] Васьковский Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії: – Київ, НТУУ "КПІ", 2003. – 164 с.
- [3] Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А., Горчаков Е.В. Тяговые электрические машины и трансформаторы. – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.
- [4] Папазов Ю.Н., Чувашев В.А., Васьковский Ю.Н., Гайденко Ю.А. Анализ механических характеристик короткозамкнутых асинхронных электродвигателей методами теории электромагнитного поля // "Электротехника і електромеханіка", №1, 2005, С. 45 –47.

Надійшла 07.09.2006

## ДИАГНОСТИКА ТЕКУЩЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Жаворонков М.А., к.т.н., доц., Ткаченко С.А.,

Московский энергетический институт (Технический университет)

Россия, 111250, Москва, Красноказарменная улица, д. 14, МЭИ (ТУ), каф. "Электрические и электронные аппараты"  
тел. +7 (495) 362-78-35, e-mail: tkachen\_sw@mail.ru

*Дана стаття присвячена дослідженню і аналізу результатів. Робота проводиться на кафедрі "Електричні і Електронні апарати" Московського Енергетичного інституту (Технічного університету).*

*Данная статья посвящена исследованию и анализу результатов. Работа проводится на кафедре "Электрические и Электронные аппараты" Московского Энергетического института (Технического университета).*

В настоящее время уровень износа основных фондов электроэнергетики России достиг 50% и в ближайшие 10 лет достигнет 70%. Анализ старения электротехнического оборудования показывает, что степень износа основных фондов, например в Федеральной сетевой компании (ФСК), в среднем составляет 48,5%. Наибольший износ имеет оборудование подстанций, на которых отработали свой нормативный срок 27% силовых выключателей напряжением 330-750 кВ.

В тоже время перед человечеством в мире все более остро стоит проблема эффективного пользования природных ресурсов. И все это происходит на фоне усиливающейся конкуренции и поглощением всех производителей на постсоветском пространстве в рыночные отношения.

Все это подталкивает современные энергосистемы максимально использовать коммутационную технику на местах.

В то же время диагностика текущей работоспособности коммутационного аппарата, на сегодняшний день сводится к периодической проверке свойств изоляции, переходного сопротивления силовой цепи, смазки всех трущихся узлов, замер хода подвижных частей и правильности функционирования, при этом сроки проведения проверок регламентирует производитель без учета особенности эксплуатации оборудования.

Если обратиться к реальным случаям эксплуатации оборудования, то можно отметить, что иногда реальный срок эксплуатации может измеряться десятком или единицами циклов "включение-отключение" (ВО), например, при работе выключателя в режиме короткого замыкания на дугowych печах, при регламентируемых нескольких десятках. Уровень отключаемого тока каждый раз будет разный, а значит и условия отключения, а, следовательно и износ для всех частей аппарата разные. При этом, технику не возможно после каждого цикла ВО подвергать диагностике из-за сложности технологического процесса и его дороговизны.

В конструкциях советских разработок эти вопросы решались достаточно просто. Так как все оборудование, которое находилось в эксплуатации, имело воздушную или масляную среду гашения дуги, то к каждому узлу имелся простой способ доступа. Другими словами можно было без ущерба для дальней-

шего использования этой техники разобрать ее и реально оценить состояние конкретной части аппарата: контактной системы, приводного механизма и других узлов аппарата в отдельно взятых условиях работы.

С внедрением новой техники (вакуумной и элегазовой), обслуживающий персонал, с большим опытом эксплуатации старого оборудования, может столкнуться с проблемой доступа к контактам (ВДК и элегазовые камеры /далее ЭГК/) или не возможностью разбора конструкции привода и т.д. (в случаях, когда техника не обслуживаемая).

На основании этого новым направлением в развитии системы технического обслуживания и ремонта является разработка подходов, основанных на индивидуальном наблюдении за реальными изменениями технического состояния оборудования в процессе эксплуатации.

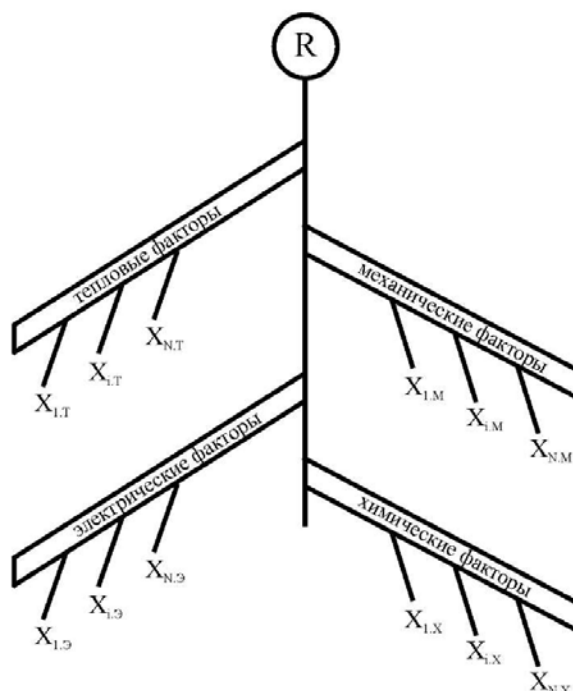


Рис. 1

В большинстве случаев измерение физических характеристик и величин не дают комплексной, качественной и количественной оценки технического со-

стояния электрооборудования или отдельной его сборочной единицы (рис. 1), а фиксируют лишь отдельные дефекты или их признаки. При этом, как правило, по результатам диагностирования сложно определить конкретную причину дефекта. Поэтому видится важной задачей создание комплексного метода определения технического состояния, способного объединить разностороннюю диагностическую информацию, и на этой базе дать количественную оценку технического состояния электрооборудования.

Действительно, при нахождении коммутационного аппарата во включенном состоянии, когда он находится под напряжением, процесс отработки ресурса происходит менее интенсивно, чем при выполнении операции отключения тока нагрузки или тока короткого замыкания. Во время выполнения операции отключения нагрузки (размыкания цепи) переходное сопротивление контактов высоковольтного коммутационного аппарата постепенно увеличивается, начинает гореть дуга, которая приводит к сильному нагреву контактной системы и дугогасительной камеры. Процесс сопровождается эрозией контактных поверхностей, выбросу расплавленного металла с поверхности контактов, а также разрушением материала изоляции ВДК или ЭГК тепловыми потоками. Кроме того, в процессе выполнения коммутационной операции происходит износ привода выключателя. Отметим, что погодные условия эксплуатации выключателей в северных районах являются наиболее тяжелыми, поэтому в статическом состоянии выключатели подвергаются большему износу, чем в центральных районах. Однако даже там техническое состояние выключателей присоединений хуже, чем состояние ШСВ и ОВ в связи с тем, что количество коммутаций, совершенное ими за межремонтный период, отличается более чем в 2 раза. Необходимо отметить, что количество коммутаций токов в функции величины отключаемого тока является основным фактором отработки ресурса выключателя, что подтверждает необходимость применения в качестве единиц измерения наработки количество коммутаций для конкретных условий применения ( $I_n$  - номинального тока,  $I_{o.n}$  - номинального тока отключения,  $U_n$  - номинального напряжения).

Контроль работоспособности аппарата, по материалам работы, может производиться путем постоянного контроля состояния контактной системы. Это можно реализовать двумя способами.

Способ 1. Так как величина переходного сопротивления определяет температуру в контактном узле (1), то необходимо установить термодатчик на оболочку ВДК или ГНДК и в соответствии с предельными температурными значениями производить вывод аппарата из эксплуатации.

$$T_M = T_{OKP} + \frac{\rho I^2}{K_T p S} + \frac{R_{\mu} I^2}{2\sqrt{\lambda K_T p S}} + \frac{R_{\mu} I^2}{8\lambda p}. \quad (1)$$

Подобный вариант уже применяется на некоторых аппаратах. В частности его можно встретить на платах микросхем, которые необходимо защищать от перегрева.

Такой способ очень прост и отражает реальность условий места эксплуатации. В финансовом плане он не требует существенных вложений, но необходимо устанавливать конкретные границы для каждого типа коммутационного аппарата каждого производителя.

Способ 2. Вместо термодатчика установить вольтметр, который так же в реальном времени отражает пригодность к коммутации аппарата.

Способ 3. Способом пересчета срока службы аппарата во временных единицах, основанный на пересчете величины тока коммутации и режима оперирования в безразмерные условные единицы с последующим расчетом необходимых значений. Теоретические расчеты показателей надежности в зависимости от наработки приведены на рис. 2.

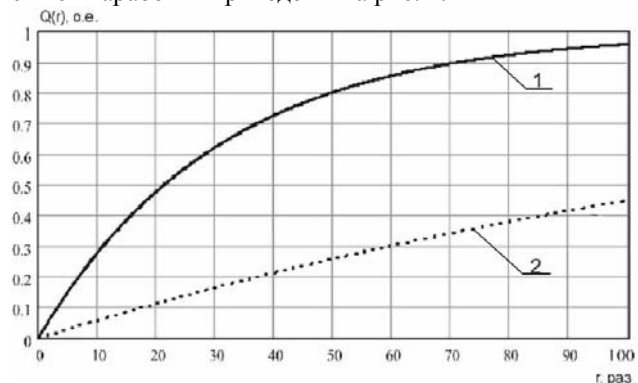


Рис. 2

Этот способ можно реализовать на базе современных микропроцессорных устройств постоянный пересчет вероятного срока эксплуатации после совершения каждой операции без вывода оборудования из строя.

Он позволит облегчить процесс эксплуатации оборудования и снизить риски в энергосети.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Электрические и электронные аппараты. Под ред. Ю.К. Розанова, М: Информэлектро, 2001. – 420 с.
- [2] Таев И.С. "Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения". М. "Энергия", 1973.
- [3] "Электрическая эрозия силовых контактов и электродов". Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. – М. "Энергия" 1978. – 256 с., ил.

Поступила 07.09.2006



## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ШНЕКОВОГО ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И НАГРУЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Заблудский Н.Н., к.т.н., доц.

Донбасский государственный технический университет

Украина, 94204, Луганская обл., Алчевск, пр. Ленина 16, ДонГТУ, каф. "Электрические машины и аппараты"  
тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87, e-mail: info@dgmi.edu.ua

*Досліджені процеси теплообміну та тертя при взаємодії електротепломеханічних перетворювачів енергії з навантажувально-охолоджуючим середовищем.*

*Исследованы процессы теплообмена и трения при взаимодействии электротепломеханических преобразователей энергии и нагрузочно-охлаждающей среды.*

### ВВЕДЕНИЕ

Традиционно охлаждающую среду электрических машин рассматривают как среду с бесконечно большой теплоемкостью, не создающую ощутимого нагрузочного момента [1, 2]. При этом экономичность системы охлаждения оценивается по количеству энергии, затрачиваемой на циркуляцию охлаждающих сред, а джоулевы потери в проводниках, потери на перемагничивание и вихревые токи в магнитных проводящих массах, потери трения роторов, составляющие в различных типах машин 10...30%, необратимо путем теплообмена удаляются в пространство. С появлением нового класса электротепломеханических преобразователей энергии (ЭТМП) технологического назначения был внесен ряд новых представлений о взаимодействии преобразователя и технологической среды [3, 4]. Полифункциональность ЭТМП, непосредственный контакт наиболее нагретой части с перерабатываемым материалом дает возможность использования энергии диссипации для нагрева и сушки материала. Более того, энергия, в том числе механическая, передается непосредственно материалу без дополнительных механизмов редукции. Вместе с тем, при создании ЭТМП необходимо установить реальные механические и тепловые нагрузки, которые формируются технологической средой и воздействуют на вращающуюся часть ЭТМП, при заданных параметрах технологического режима (производительность, начальная и конечная влажность и температура, гранулометрический состав продукта и др.). В настоящее время исследования подобных процессов в известных публикациях отсутствуют.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель приведенных в данной работе исследований – определение температурных и механических характеристик нагрузочно-охлаждающей среды в пограничных слоях изотермических поверхностей шнекового ЭТМП.

### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рабочий слой перерабатываемого материала расположен между двумя изотермическими стенками, нагретыми, в общем случае, до разных температур. На рис. 1 показана схема распределения взаимодействующих потоков сыпучего материала и воздушного

теплого агента, сформированного внутри шнекового ЭТМП (статор условно не показан).

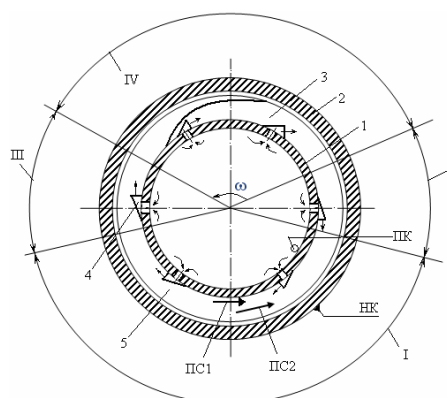


Рис. 1. Схема распределения потоков нагрузочно-охлаждающей среды ЭТМП:

I – ламинарная область; II – переходная область встречных струй материала и воздуха; III – переходная область "кипящего слоя"; ПС1 – пограничный слой ротора; ПС2 – пограничный слой дна шнека; 1 – массивный ротор; 2 – днище шнека; 3 – винтовая лопатка ротора; 4 – осевая лопатка ротора; 5 – сыпучий материал

В пограничном слое ПС, прилегающем к поверхности массивного ротора, создаются условия для возникновения закрученного вихревого потока теплового воздушного агента и материала, одновременно снижающего турбулентное трение. Экспериментально образование вихревого потока установлено путем измерения проводимости слоя графитового потока в следующих режимах работы шнекового ЭТМП: неподвижное состояние ротора ( $s = 1$ ) и отсутствие нагнетания теплового агента; вращение ротора с угловой частотой  $\omega = 11,5$  рад/с при нагнетании воздушного теплового агента. При вращающемся роторе ЭТМП и работе вентиляционной сети нагнетания отмечено (в 5 – 6 раз) снижение активного сопротивления графитового слоя в сравнении с режимом неподвижного ротора и отсутствия вдува теплового агента. Контроль величины активного сопротивления производился мостом постоянного тока, при этом функции электродов выполняли элементы конструкции ЭТМП – ротор и днище, на которых располагались подвижный (ПК) и неподвижный (НК) контакты. Исследова-

ние процессов в закрученном вихревом потоке связаны со значительными сложностями, так как корректное аналитическое описание двухкомпонентного, а иногда и трехкомпонентного, закрученного потока отсутствует. В связи с этим в данной работе выяснение влияния отдельных режимных и конструктивных параметров проводилось с помощью численного моделирования, позволяющего учитывать как теоретические зависимости, так и эмпирические данные, полученные из натуральных исследований.

Математическая модель реализована в виде комплекса программ: уравнения движения воздушного теплового агента, расписанные по трем составляющим в цилиндрической системе координат, дополненные эмпирическими зависимостями обратного влияния сыпучего материала на воздушный поток; уравнение движения твердой частицы материала с учетом взаимодействия с воздушным потоком и отскока от лопаток шнека и поверхности ротора; уравнения сложного теплообмена между частицей и воздушным потоком; уравнение кинетики сушки частицы.

В работе изучен процесс ламинарно-турбулентного перехода и локальных характеристик ПС2. Температура регистрировалась с помощью микротермометрического зонда, изготовленного из медь-константановых проволок диаметром 30 мкм с градуировочной характеристикой,  $E = \varepsilon_1(100 - T_x) + \varepsilon_2(T_r - 100)$  где  $\varepsilon_1 = 0,0042$ ,  $\varepsilon_2 = 0,053$ ;  $T_x$ ,  $T_r$  – соответственно температура холодного и горячего слоев. Для регистрации полей скорости использован термоанемометр постоянной мощности с верхней границей частотного диапазона 10 кГц. Чувствительным элементом служила нить из платинированного вольфрама диаметром 2,2 мкм и длиной 0,33 мм, приваренная к датчику 55A22 фирмы DISA. Независимость сигнала от температуры движущейся среды (температурная компенсация) обеспечивалась введением в измерительную цепь термопары регулируемой ЭДС от независимого источника, равной по численному значению и противоположной по знаку ЭДС термопары при выключенном нагревателе.

Статистическая обработка мгновенных значений температур проводилась с использованием пакета программ для спектрального анализа случайных процессов.

Для установления корреляции пространственной формы движения материала с изменением локального коэффициента теплоотдачи проводилось экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи с изотермических поверхностей ЭТМП методом стационарного теплового потока. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  на малой площадке  $\Delta F$  может быть найден, если измерен температурный напор  $(T_1 - T_2)$  и мощность  $\Delta P$ , отводимая средой (перерабатываемым материалом) с поверхности в стационарном тепловом режиме:

$$\alpha = \frac{\Delta P}{\Delta F(T_1 - T_2)}. \quad (1)$$

Источником тепловыделения служит сама исследуемая поверхность с известной мощностью тепловыделений. Для измерения температурного перепада

использован пассивный измеритель на термопарах, представляющий одиночную дифференциальную термопару, в которой константановая пластинка служит одновременно дополнительной стенкой и электродом.

В настоящей работе исследована эволюция температурных пульсаций в ПС у стенки дна шнекового ЭТМП как по нормам к стенке (координата  $y$ ), так и вдоль нее (координата  $x$ ). В соответствии с рис. 1 в ПС вдоль окружности дна можно выделить четыре области: ламинарную; переходную зону встречных струй материала и воздуха; переходную зону "кипящего слоя"; турбулентную.

На рис. 2 показаны среднеквадратичные значения пульсаций температуры  $\sigma_T$  в ПС у дна шнека, полученные для названных областей движения материала при разности температур изотермических стенок  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ .

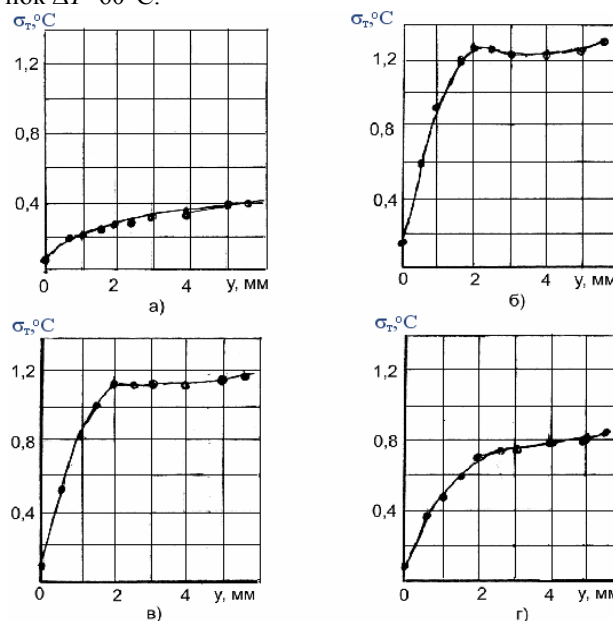


Рис. 2. Распределение среднеквадратических пульсаций температуры в пограничном слое по окружности дна шнекового ЭТМП: а) ламинарная область; б) переходная область встречных струй материала и воздуха; в) переходная область "кипящего слоя"; г) турбулентная область

Графический материал рис. 2 указывает на то, что в пределах ламинарной области ПС заметные температурные пульсации появляются лишь при увеличении расстояния по нормам от стенки дна и формируются в основном действием осевых лопаток ротора ЭТМП.

Максимальные значения температурных пульсаций отмечаются в переходных областях, где ламинарное движение материала переходит в конвективно-турбулентное.

На рис. 3 представлены фрагменты отдельных аналоговых реализаций температурных пульсаций, полученных в переходной области "кипящего слоя" на различных расстояниях от стенки дна шнека ЭТМП. Число Релея  $Ra$ , характеризующее механизм возникновения конвекции, при этом находилось в диапазоне  $Ra = 3,12 \cdot 10^8 - 6,9 \cdot 10^8$ .

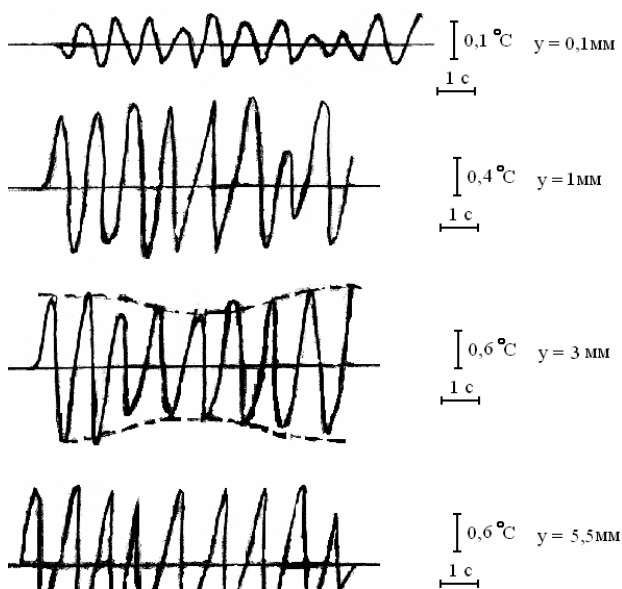


Рис. 3. Фрагменты аналоговых сигналов при изменении пульсаций температуры

Информацию о частотном распределении пульсаций целесообразно представить в виде нормированных на дисперсию частотных спектров мощности  $S$  температурных пульсаций, полученных на фиксированном ( $y=3$  мм) расстоянии от стенки днища шнекового ЭТМП. Спектры измерены во всех областях вдоль окружности ротора. Частотные спектры мощности пульсаций температуры представлены на рис. 4.

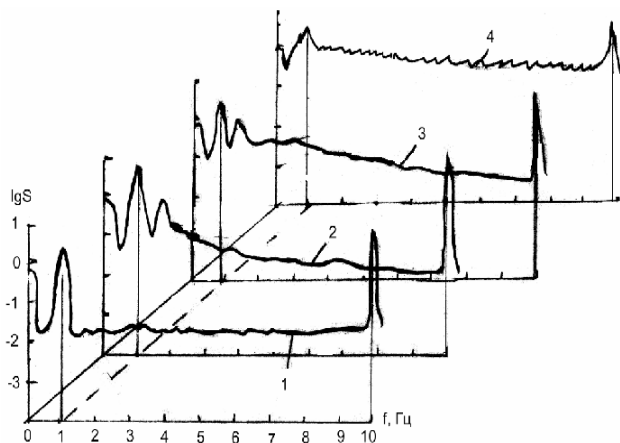


Рис. 4. Частотные спектры мощности пульсаций температуры: 1 – ламинарная область; 2) переходная область встречных струй материала и воздуха; 3) переходная область "кипящего слоя"; 4) турбулентная область

Из рис. 4 следует, что в температурных пульсациях выделяются характерные частоты, амплитуды этих пульсаций изменяются случайным образом, а минимальные значения пульсации имеют вблизи стенки днища шнекового ЭТМП. Наиболее интенсивные пульсации температуры наблюдаются на частотах 1,1 Гц и 10 Гц. Частота 1,1 Гц соответствует термогравитационному механизму возникновения конвекции, а частота 10 Гц формируется принудительной

конвекцией, создаваемой осевыми лопатками ротора-шнека и воздушными струями теплового агента. Кривая 4 на рис.4 отражает сплошной спектр мощности пульсаций, характерный для турбулентного режима.

Локальный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в различных областях ПС исследован для двух перепадов температур между изотермическими поверхностями шнекового ЭТМП:  $\Delta T=100^\circ\text{C}$  (более нагрет массивный ротор);  $\Delta T=60^\circ\text{C}$  (более нагрето днище шнека).

На рис. 5 представлена зависимость локального коэффициента теплоотдачи от днища шнека для ламинарной, переходной и турбулентных областей при  $\Delta T=60^\circ$ .

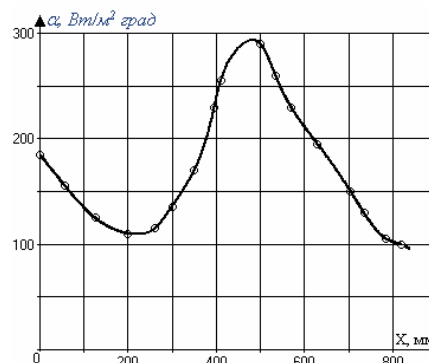


Рис. 5. Локальный коэффициент теплоотдачи в различных областях движения материала в шнековом ЭТМП

Как видим, перестройка пространственной формы течения (движения) материала коррелирует с изменением локального коэффициента теплоотдачи. Заметьного максимума коэффициент теплоотдачи достигает в переходной области как для зоны "кипящего слоя", так и в зоне встречных струй материала и воздуха.

На рис. 6 приведена в безразмерной форме зависимость теплоотдачи нагретой стенки днища шнека в ламинарной и начальной части переходной области.

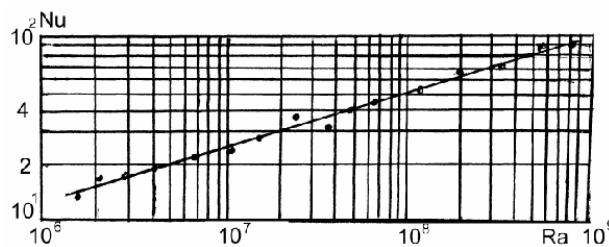


Рис. 6. Безразмерные локальные коэффициенты теплоотдачи в зависимости от числа Рейля

В переходной области ПС на расстоянии  $y=3$  мм от стенки днища шнека (см. рис. 6) наблюдается амплитудная модуляция пульсаций температуры основной частоты ( $f=10$  Гц) термогравитационной частотой  $f=1,1$  Гц.

На рис. 7 представлены экспериментальные данные максимальных значений окружной компоненты скорости потока материала в различных областях ПС на расстоянии  $y=5$  мм от стенки днища. Минимальные значения скорости наблюдаются в ламинарной области (самая низкая точка окружности днища шнека) и в турбулентной области (самая верхняя точка окружности днища шнека). Более высокая скорость воздушно-

го теплового агента (55 м/с) в сравнении с окружной скоростью осевых лопаток (0,3 м/с), неполное заполнение шнека материалом (коэффициент заполнения  $\varphi=0,55$ ), очевидно, формируют условия для резкого снижения окружной скорости материала и даже изменения ее знака по отношению к направлению вращения шнека.

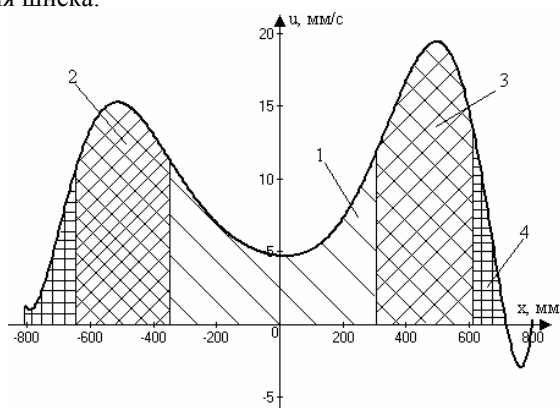


Рис. 7. Максимальные значения окружной компоненты скорости потока материала в различных областях ПС: 1 – ламинарная область; 2) переходная область встечных струй материала и воздуха; 3) переходная область "кипящего слоя"; 4) турбулентная область

Измерения характеристик трения и массообмена без внесения существенных возмущений в ПС1 проводились с применением датчиков трения, измерение пульсаций давления – пьезокерамическими датчиками с приемной поверхностью диаметром 1,5 мм. На рис. 8 представлены изменения касательных напряжений трения  $\tau$  вдоль стенок и вдоль прилегающих поверхностей слоев материала, перемещаемых шнеком и не вовлеченных в вихревые потоки.

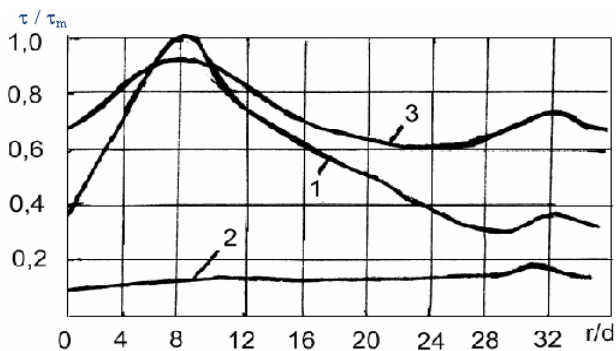


Рис. 8. Распределение трения в ПС1 шнекового ЭТМП:  $d = 5$  мм – диаметр сопла;  $\tau_m$  – максимальное значение трения в данном сечении;  $Re = 4,2 \dots 7,5 \cdot 10^4$  – критерий Рейнольдса;  $r$  – расстояние между смежными осевыми лопатками

Кривая 1 на рис. 8 представляет собой изменение трения в зоне шнека, заполненной материалом, кривая 2 – в верхней зоне шнека; кривая 3 – трение вдоль поверхности прилегающего слоя материала в зоне, заполненной материалом.

Основной максимум касательных напряжений трения располагается на расстоянии  $0,25r$ , второй максимум – вблизи смежной осевой лопатки.

Задача о течении в окрестности критической точки имеет достаточно точное решение [5].

Касательное напряжение на стенке при этом определяется выражением:

$$\tau = 1,312 K_{н.п.} \rho \beta_c \sqrt{\beta_c \nu r}, \quad (2)$$

где  $r$  – радиальная координата;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $\rho$  – плотность двухкомпонентной среды;  $K_{н.п.}$  – коэффициент, учитывающий неравномерность профиля скорости.

Значение коэффициента  $\beta_c$  можно определить по формуле:

$$\beta = 0,44 u_0 / r_0, \quad (3)$$

где  $u_0$  – скорость истечения из сопла;  $r_0$  – начальный радиус струи.

## ВЫВОДЫ

1. Получены локальные коэффициенты теплоотдачи в различных областях движения материала в шнековом ЭТМП, касательные напряжения на стенке, а также безразмерные коэффициенты теплоотдачи, которые позволяют оценить работу ЭТМП в различных областях потоков материала.

2. Получены зависимости распределения среднеквадратических отклонений пульсаций температуры в пограничном слое, частотное распределение пульсаций температуры в различных областях перемешивания сыпучего материала.

3. Определены максимальные значения окружной компоненты скорости потока материала в различных областях пограничного слоя, что дает возможность сформировать условия изменения скорости материала в различных областях, возникающих при работе шнекового ЭТМП.

4. Результаты исследований являются основополагающими для получения и исследований температурных и механических характеристик нагрузочно-охлаждающей среды в пограничных слоях изотермических поверхностях шнекового ЭТМП.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974 – 383 с.
- [2] Копылов И. П. Электрические машины: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк.; Логос, 2000 – 607 с.
- [3] Пат. 50242 Україна. МКИ 7 F 26B17/18, 3/347. Шнековый сушильный аппарат/ М.М. Заблодський, В.Ф. Шинкаренко, В.С. Плюгін та інш. – № 8244; Заявл. 03.12.2001; Опубл. 17.01.2005. Бюл. № 1 – 3 с.
- [4] Пат. 75771 Україна. МПК (2006) H 05B/10. Заглибний електронагрівач/ М.М. Заблодський, В.Ф. Шинкаренко, В.С. Плюгін та інш. – № 5162; Заявл. 29.06.2004; Опубл. 15.05.2006. Бюл. № 5 – 3 с.
- [5] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 540 с.

Поступила 30.08.2006

## МІЖНАРОДНИЙ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ СЛОВНИК: УКРАЇНСЬКІ ПЕРЕСПЕКТИВИ

Клименко Б.В., д.т.н., проф.,  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"  
Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра "Електричні апарати"  
тел. (057) 707-62-81, e-mail: kbv@kpi.kharkov.ua

*Продовжується публікація перекладів вибраних частин МЕС, а саме частини 441 - Switchgear, controlgear and fuses (Комутаційна апаратура, апаратура керування та запобіжники). Пропонується переклад розділу 441-14 – "Switching devices (Комутаційні апарати)".*

*Продолжается публикация переводов избранных частей МЭС, а именно части 441 - Switchgear, controlgear and fuses (Коммутационная аппаратура, аппаратура управления и предохранители). Предлагается перевод на украинский язык раздела 441-14 – "Switching devices (Коммутационные аппараты)".*

(продовження, початок у № 2)

Починаючи перекладати вибрані частини Міжнародного електротехнічного словника, я не міг уявити, наскільки складною виявиться ця робота. Адже, хіба існують серйозні проблеми при перекладі з російської мови радянських ГОСТ'ів? Навряд чи. Бо коли Україна входила до складу Радянського Союзу, українська фахова термінологічна база майже завжди будувалася шляхом буквального перекладу російськомовних термінів<sup>1</sup> і питання зводилося до того, яку лексичну гілку української мови треба взяти за основу. Наприклад, як правильно перекласти слово "магнитный": "магнітний" чи "магнетний", або словосполучення "электрическая цепь": "електричне коло" чи "електричний ланцюг"? Відтак, у чому ж проблеми перекладу частини 441 МЕС? Адже існує офіційний російський переклад цієї частини – бери і перекладай. Але не все так просто: радянські ГОСТ'и друкувалися лише однією мовою – російською, а частини МЕС публікуються щонайменше двома мовами – французькою (*fr*) та англійською (*en*), частина 441 та деякі інші – ще й російською (*ru*), а кожний з термінів дається (без тлумачення) ще декількома мовами, зокрема, німецькою (*de*), голландською (*ne*), польською (*pl*) та шведською (*sv*). І коли зіставляєш, скажімо, англомовний оригінал з російським перекладом, то іноді виникає сумнів у адекватності останнього. І хоча фаховість перекладачів не слід скидати з рахівниць, все ж таки, не цей

фактор вплинув на якість перекладу – за більш ніж 60 років після розриву із Заходом і майже автономного розвитку, в радянській електротехніці сформувалася усталена термінологічна база, принципи побудови якої далеко не завжди співпадали з принципами побудови термінологічної бази МЕС. Відтак, намагання знайти російськомовні аналоги термінів МЕС не завжди увінчувалися успіхом. Останню тезу проілюструємо декількома прикладами.

У розділі 441-14 – "Switching devices", назва якого перекладена російською мовою, як "Коммутационные аппараты" (що до речі, не викликає жодних заперечень), особливе значення має термін "Switch", який є корінням назви цього розділу і який фігурує у визначеннях 19 з 53 термінів цієї частини і згадується у тлумаченнях майже усіх термінів. Отже, адекватний переклад цього терміну має винятково важливе значення.

Подивимося, як перекладено лише декілька термінів, що містять у своєму складі термін "Switch".  
441-14-01 Switching device Коммутационный аппарат  
441-14-10 Switch Выключатель нагрузки  
441-14-11 Earthing switch Заземлитель

Цікаво, що ГОСТ Р 50030-3-99, у якому зазначено, що він містить автентичний переклад міжнародного стандарту IEC 60947-3-99, надається переклад того самого терміну "Switch", у якому відкинута доповнення "нагрузки", отже, за цим стандартом, терміну "Switch" у відповідність ставиться російськомовний термін "Выключатель". У той же час, у Міжнародному електротехнічному словнику термін "Выключатель" ставиться у відповідність до терміну "Circuit-breaker" (IEV 441-14-20), а ГОСТ Р 50030-2-99, у якому зазначено, що він містить автентичний переклад міжнародного стандарту IEC 60947-2-99, перекладає "Circuit-breaker" як "Автоматический выключатель". Що ж стосується терміну "Заземлитель", то у чинному в Росії стандарті ГОСТ 12.1.030-81 той самий термін застосовується для визначення зовсім іншого об'єкту: "Проводник или совокупность металлических соединенных проводников, находящихся в соприкосновении с землей или ее эквивалентом". Ну і як вибратися з усієї цієї плутанини?

А може треба звернутися до першоджерел і спробувати з'ясувати оригінальний смисл термінів "Switch" та "Circuit-breaker"?

Давайте зробимо таку спробу відносно терміну "Switch" і поринемо у не таку вже далеку історію.

<sup>1</sup> Приблизно так здійснюється створення національної термінологічної бази і у наші часи. Наприклад, чинний в Україні стандарт ДСТУ 2843-94 (Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення) містить у собі терміни з аналогічного радянського стандарту ГОСТ 19880-74, наведені російською мовою та перекладені на українську. На відміну від ГОСТ, у згаданому ДСТУ для деяких термінів крім українських (далеко не усіх – наприклад, термін "змінний струм" дається лише російською мовою) наводяться німецькі, англійські та французькі аналоги. Є ще одна відмінність – у ДСТУ наводиться 213 термінів, хоча у ГОСТ'і їх 245. Натомість, у Росії у 2003 році вийшов новий стандарт – ГОСТ Р 52002-2003 з подібною назвою (Електротехніка. Терміни та определения основных понятий), у якому наводиться вже 275 термінів. Характерно, що зазначені стандарти мають приблизно однакову структуру, яка зовсім не співпадає зі структурою відповідних частин Міжнародного електротехнічного словника. Не співпадають і принципи побудови термінів у стандартах та відповідних частинах Словника (частини 111, 121, 131, 141, 151). Хіба це не цікава тема для фахівців з теоретичної електротехніки?

У ті часи, коли людство ще не користувалося електричною енергією, отже не було трамваїв, тролейбусів, метрополітену та електропоїздів, основним транспортним засобом на суші були екіпажі з кінною тягою. А пристроєм керування цією тягою був звичайний хлист – по-англійськи "switch". Цілком природно, що коли вчені люди почали досліджувати електрику, знадобився пристрій, який дозволяв би, поперше, включати електричний струм, а по-друге, виключати його. Коли такий пристрій винайшли, поставало питання, як його назвати. Можливо, саме так з'явився електротехнічний термін "Switch", який дожив до наших днів і застосовується для пристроїв, які дозволяють включати (switch-on) та відключати (switch-off) електричний струм. Зверніть увагу, спочатку ми включаємо струм, а відключаємо його – потім. І основною функцією багатьох пристроїв, які керують електричним струмом, є функція вмикання: за допомогою цих пристроїв вмикається світло у кімнаті, верстат у цеху тощо. Отже, називати вимикачем пристрій, основне призначення якого є вмикання, принаймні з точки зору багатомільйонних мас пересічних користувачів, нелогічно – навіть відомий російський сатирик М. Задорнов не обминув своєю увагою цю колізію. Хоча з цього приводу з М. Задорновим можна посперечатися – у наш час, з нашими тарифами, своєчасне вмикання стає не менш важливою функцією, а згодом, можливо, перетвориться в основну.

З точки ж зору фахівців, переклад терміну "Switch" як "Вимикач" особливих заперечень не викликає: з двох функцій цього апарату – вмикання та вмикання – набагато складнішою та відповідальнішою є функція вмикання. З іншого боку, для фахівців набагато важливішим є не лінгвістичний бік проблеми визначення терміну, а однозначність його трактування і не допущення такого стану, коли той самий термін застосовується для визначення різних понять з близьких галузей. Отже, якщо "Switch" це "Вимикач", то що ж таке "Circuit-breaker"? Теж "Вимикач"? Але ж за відповідними визначеннями "Switch" та "Circuit-breaker" не є синонімами: перший з них спроможний відключати лише номінальні струми та робочі перевантаження, а другий – ті самі струми, а також струми короткого замикання.

Англомовні та франкомовні терміни у Словнику чітко розтлумачені і, хоча за своїм первинним смислом дуже приблизно окреслюють функції апаратів, до яких вони застосовуються, але чітко й однозначно за написанням та виголошенням розрізняють об'єкти з різними властивостями. Такий самий підхід (назвемо його **протокольним**) – чітко розрізнити поняття, не завжди переймаючись змістом визначення, застосовано у французьких та польських термінах (а також у термінах на деяких інших мовах, що не представлені у Словнику, наприклад, чеських – *cz*):

	441-14-05	441-14-10	441-14-20
<i>en</i>	Disconnecter	Switch	Circuit-breaker
<i>fr</i>	Sectionneur	Interrupteur	Disjoncteur
<i>pl</i>	Odłącznik	Rozłącznik	Wyłącznik
<i>cz</i>	Odpojovač	Odpínač	Vypínač

Можна лише поаплодувати нашим польським та чеським колегам: наведені вище терміни за своїм первинним смислом важко розрізнити, а от за написанням та виголошенням вони є різними, отже чітко, од-

нозначно і, що також дуже важливо, стисло визначають об'єкти, відносно яких вони вживаються.

Інший підхід (назвемо його **змістовим**) застосовано у німецькій, голландській та шведській термінології: термін не тільки формально, а й за смислом, відповідає об'єктові, щоправда це досягається за рахунок певних особливостей цих мов, пов'язаних з практикою побудови складних слів, наприклад: Switch (*en*) – Lastschalter (*de*), Lastschakelaar (*ne*), Lastbrytare (*sv*); Circuit-breaker (*en*) – Leistungsschalter (*de*), Vermogenschakelaar (*ne*), Effektbrytare (*sv*)<sup>2</sup>. Як бачимо, і у цих випадках термінологія базується на принципі унікальності визначення – один термін відповідає тільки одному об'єктові<sup>3</sup>.

Якщо зосередитися на англійському терміні "Circuit-breaker", то не важко побачити, що жодний з наведених вище іншомовних термінів не містить жодного натяку на автоматичність дії цього апарату, чого нема й у англійському та французькому його тлумаченні, яке наводиться у Словнику. Чому ж тоді у російському перекладі, який міститься у стандарті ГОСТ Р 50030-2-99 "Circuit-breaker" – це "Автоматический выключатель", а скорочено – "Выключатель"? Певна логіка у такому перекладі є – зазначений стандарт стосується апаратів **низької** напруги, серед яких нема жодних комутаційних апаратів, спроможних ефективно відключати струми короткого замикання, крім автоматичних вимикачів. Отже, у даному контексті "Выключатель" – це "Circuit-breaker". А от якщо зазирнути до іншого російського стандарту – ГОСТ Р 50030-3-99, то побачимо, що "Выключатель" – це "Switch". Як же розрізнити ці поняття? За контекстом. Тому такий підхід до перекладу термінів назвемо **контекстним**.

Наша зосередженість на двох вищезгаданих термінах ("Switch" та "Circuit-breaker") викликана не стільки наявністю певних колізій, які існують у російськомовному перекладі цих термінів (краще сказати – російськомовних перекладах, бо цих перекладів – декілька і усі вони є офіційними), а фундаментальним значенням цих термінів для низки Міжнародних стандартів, які використовують зазначені терміни, і які, рано чи пізно, будуть впроваджені в Україні.

Якщо читач на цьому місці ще не заснув, то це означає що він усвідомлює важливість застосування коректної термінології, а відтак, погодиться з тим, що існує можливість застосування декількох підходів до створення української версії Словника. Ці підходи, з огляду проведеного аналізу визначення термінів "Switch" та "Circuit-breaker", умовно можна умовно назвати як контекстний, змістовий та протокольний.

<sup>2</sup> Дослівні українські переклади цих термінів з німецької мови є такими: Lastschalter – вимикач навантаження; Leistungsschalter – силовий вимикач.

<sup>3</sup> Зазначеного порозуміння представники різних націй щодо визначень комутаційних апаратів досягли не так вже й давно: ще у другому виданні Міжнародного електротехнічного словника (1963 р.) французькому терміну "Interrupteur" німці поставили у відповідність термін "Ausschalter", а от англійці у своїй мові не відшукали відповідного терміну, хоча й переклали з французької відповідне тлумачення. Навпаки, французи у своїй мові тоді не знайшли аналогів англійським термінам "Switch" і "Circuit-breaker", хоча й переклали англійські тлумачення на французьку мову. Німці ж переклали ці терміни відповідно як "Schalter" та "Leistungsschalter".

**Контекстний підхід.** Визначення у Словнику даються з урахуванням усталених (з радянських часів) термінологічних традицій, а при застосуванні їх у стандартах вводяться певні уточнення. Якщо застосувати такий підхід, то у Словнику та стандартах для апаратів високої напруги термін "Switch" слід перекладати як "Вимикач навантаження", а термін "Circuit-breaker" – як "Вимикач", у той час, як у стандартах для апаратів низької напруги термін "Switch" слід перекладати як "Вимикач", а термін "Circuit-breaker" – як "Автоматичний вимикач". При такому підході відкритими лишаються багато питань, наприклад, як перекласти термін "Earthing switch" або як перекласти такий вираз: "Circuit-breakers which open automatically..." (IEC 60947-2, 7.2.1.2.1)? "Автоматичні вимикачі, що розмикаються автоматично..."? Подібних прикладів можна навести дуже багато, тому контекстний підхід навряд чи можна вважати перспективним.

**Змістовий підхід.** При цьому підході все значно простіше: "Switch" – "Lastschalter" – "Вимикач навантаження", "Circuit-breaker" – "Leistungsschalter" – "Силовий вимикач". І навіть з терміном "Earthing switch" майже не виникає питань: "Erdungsschalter" – "Вимикач заземлення". Ми кажемо "майже не виникає питань", тому що термін "Schalter" має на увазі не тільки функцію вмикавання, а й вмикання, перемикавання і взагалі – комутації (до речі, як і термін "Switch"). До того ж, недоліком змістового підходу є задовгі визначення.

**Протокольний підхід.** При цьому підході термін, за своїм первинним смислом, може не у повній мірі відповідати функції апарату, але при підборі терміну упор робиться на його графічну (написання) та акустичну (виголошення) унікальність. Забезпечуючи повну відповідність національних термінів англо мовним оригіналам, даний підхід вимагає знаходити і запроваджувати нові визначення для деяких термінів, які раніш механічно перекладалися з російської мови, зокрема, для термінів "Switch" та "Circuit-breaker".

Якщо поставити за мету сконструювати скорочені визначення (з одного слова – по аналогії з іншомовними термінами), то українська мова надає багато можливих варіантів: "Вимикач", "Вмикач", "Відмикач", "Розмикач", "Перемикач" тощо. При цьому треба враховувати, що кожна людина по декілька разів на день натискає на **вимикачі**, включаючи світло у помешканнях, офісах та виробничих приміщеннях. І переконати мільйони громадян у тому, що вимикачі відтепер будуть називатися якось інакше, є абсолютною утопією. Отже "Switch" – це "Вимикач". При цьому треба мати на увазі, що англійській термін "Switch" узагальнює комутаційні операції (вмикання, вимикання, перемикавання)<sup>4</sup>. Таким чином, цей термін можна перекладати не тільки як "Вимикач", застосовуючи

<sup>4</sup> У стандарті IEC 60947-3 зазначається (1.1, Note 2): "In this standard word "switch" also applies to the apparatus referred to in French as "commutateurs" intended to modify the connections between several circuits and *inter alia* to substitute a part of a circuit for another" (У даному стандарті слово "switch" застосовується також до апаратів, які французькою мовою називають "commutateurs" (перемикачами), що призначені для зміни зв'язків між декількома колами, а саме для заміни однієї частини у колі на іншу). Як бачите, розробники англійської термінології, знаючи про існування терміну "перемикач" в інших мовах, не переймаються пошуками нового терміну, цілком слушно вважаючи, що всі комутаційні функції (вмикання, вимикання, перемикавання) охоплює термін "switch".

цей переклад для апаратів з одним контактом у полюсі, а й як "Перемикач" – для апаратів з декількома контактами у полюсі. Подивіться, як у цьому випадку можуть виглядати деякі з найуживаніших термінів, що мають у своєму складі слово "switch":

switch	– вимикач, перемикач;
earthing switch	– перемикач заземлення;
control switch	– перемикач керування;
pilot switch	– керований перемикач;
switch-disconnector	– вимикач-роз'єднувач;
switch-fuse	– вимикач-запобіжник;
position switch	– шляховий перемикач тощо.

Звертаю увагу читачів: наведений варіант перекладу термінів, що мають у своєму складі слово "switch", є лише пропозицією, яка потребує критичного обговорення, в результаті якого, можливо, з'являться інші та кращі варіанти.

Фахівців, які стикаються з комутаційними апаратами значно менше і, сподіваюся, їх можна переконати, що "Circuit-breaker" треба називати якось інакше, ніж "Вимикач", наприклад, як "Відмикач" або "Розмикач", бо розмикання кіл, особливо з великими струмами, такими як струми короткого замикання, є найвідповідальнішою та найскладнішою функцією цього апарату<sup>5</sup>. Цю пропозицію не слід відкидати, як утопічну, принаймні з трьох причин:

- 1) треба враховувати позитивний досвід інших країн, зокрема таких електротехнічних гігантів, як Франція чи Німеччина, які поступилися термінологічними традиціями на користь чіткості, стислості та однозначності визначень;
- 2) переклад терміну "Circuit-breaker", як "Автоматичний вимикач", викликає багато непорозумінь, про які ми вже згадували;
- 3) офіційних визначень і тлумачень поняття "Circuit-breaker" українською мовою ще не існує.

На наступних сторінках наведено неофіційний переклад розділу 14 частини 441 Міжнародного електротехнічного словника, у якому термін "Switch" перекладено як "Вимикач", "Перемикач", а термін "Circuit-breaker" як "Розмикач". Чи виявилися наведені вище доводи переконливими для фахівців? Чекаємо від них відгуків та зацікавленого обговорення.

<sup>5</sup> У 1891 році до всесвітньої виставки у Франкфурті-на-Майні під керівництвом М.І. Доліво-Добровольського була побудована перша у світі трифазна високовольтна лінія електропередачі довжиною у 170 км – від міста Лауфена, де була побудована електростанція, до Франкфурта. На той час М.І. Доліво-Добровольський вже досяг вершини слави – він винайшов трифазний генератор, трифазний трансформатор, асинхронний двигун тощо, а от зробити апарат, який би надійно відмикав лінію, йому тоді не вдалося. Треба було знайти якимось чином тимчасове рішення. І таке рішення знайшлося. Винайдений пристрій для комутації складався із сталевго бруса, який висів на звичайних мотузках над трьома провідниками на виході ЛЕП у Франкфурті та запобіжників на вході ЛЕП у Лауфені. Якщо потрібно було знеструмити лінію, брус у Франкфурті опускали на провідники, створюючи трифазне коротке замикання. При цьому запобіжники у Лауфені згорали і лінія знеструлювалася. Хоча над розробкою вимикачів працювали найкращі фахівці того часу (Едісон, де Ферранті, Блаті, Сіменс, Шуккерт й інші) зробити потужний та надійний комутаційний апарат (ним став так званий масляний вимикач, який дожив майже до нашого часу) спромоглися лише у 30-х роках ХХ століття.

<p style="text-align: center;"><b>INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL VOCABULARY</b> Chapter 441 <b>SWITCHGEAR, CONTROLGEAR AND FUSES</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>МІЖНАРОДНИЙ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ СЛОВНИК</b> Частина 441 <b>КОМУТАЦІЙНА АПАРАТУРА, АПАРАТУРА КЕРУВАННЯ ТА ЗАПОБІЖНИКИ</b></p>
<b>441-14 Switching devices</b>	<b>441-14 Комутаційні апарати</b>
<p><b>441-14-01 Switching device</b> A device designed to make or break the current in one or more electric circuits.</p>	<p><b>441-14-01 Комутаційний апарат</b> Апарат, призначений для включення або відключення струму в одному чи декількох електричних колах.</p>
<p><b>441-14-02 Mechanical switching device</b> A switching device designed to close and open one or more electric circuits by means of separable contacts.</p> <p><i>Note.</i> - Any mechanical switching device may be designated according to the medium in which its contacts open and close, e.g. air, SF<sub>6</sub>, oil</p>	<p><b>441-14-02 Контактний комутаційний апарат</b> Комутаційний апарат, призначений для замикання та розмикання одного або декількох електричних кіл за допомогою контактів, що відділяються.</p> <p><i>Примітка.</i> – Будь-який контактний комутаційний апарат може бути визначений відповідно до середовища, де його контакти розмикаються та замикаються, наприклад, повітряний, елегазовий, масляний.</p>
<p><b>441-14-03 Semiconductor switching device</b> A switching device designed to make the current in an electric circuit by means of the controlled conductivity of a semiconductor.</p>	<p><b>441-14-03 Напівпровідниковий комутаційний апарат</b> Комутаційний апарат, призначений для включення струму в електричному колі за допомогою керування провідністю напівпровідника</p>
<p><b>441-14-04 Fuse-combination unit</b> A combination of a mechanical switching device and one or more fuses in a composite unit, assembled by the manufacturer or in accordance with his instructions.</p> <p><i>Note.</i> – Some fuse-combination units may be provided with a striker release such that the operation of any striker causes all poles of the associated mechanical switching device to open.</p>	<p><b>441-14-04 Комбінація запобіжник - комутаційний апарат</b> Комбінація контактної комутаційної апаратури та одного або декількох запобіжників у вигляді комплектного пристрою, зібраного виробником, або відповідно до його вказівок</p> <p><i>Примітка.</i> – Деякі комбінації із запобіжниками можуть бути обладнані розчеплювачем з ударником таким чином, що спрацювання будь-якого ударника впливає на усі полюси приєднаного контактної комутаційної апаратури.</p>
<p><b>441-14-05 Disconnecter</b> A mechanical switching device which provides, in the open position, an isolating distance in accordance with specified requirements.</p> <p><i>Note.</i> – A disconnecter is capable of opening and closing a circuit when either negligible current is broken or made, or when no significant change in the voltage across the terminals of each of the poles of the disconnecter occurs. It is also capable of carrying currents under normal circuit conditions and carrying for a specified time currents under abnormal conditions such as those of short circuit.</p>	<p><b>441-14-05 Роз'єднувач</b> Контактний комутаційний апарат, який забезпечує у відкритому положенні ізоляційний проміжок у відповідності до приписаних вимог.</p> <p><i>Примітка.</i> – Роз'єднувач здатний розмикати та замикати коло при малому струмі або незначній зміні напруги на виводах кожного з його полюсів. Він також здатний проводити струми при нормальних умовах в колі, а також проводити струм впродовж визначеного часу при ненормальних умовах, таких як коротке замикання.</p>
<p>441-14-06[07] <i>divided support disconnecter [earthing switch]</i></p> <p>A disconnecter [earthing switch] in which the fixed and moving contacts of each pole are not supported by a common base or frame.</p> <p><i>Notes 1.</i> – A typical example is the pantograph or semi-pantograph disconnecter.</p> <p>2. - This term applies to high-voltage disconnectors only.</p>	<p><b>441-14-06[07] Роз'єднувач [перемикач заземлення] з розділеними опорами</b> Роз'єднувач (заземлювач), в якому нерухомі та рухомі контакти кожного полюса не спираються на одну спільну опору або раму.</p> <p><i>Примітки 1.</i> – Характерним зразком є пантографний або напівпантографний роз'єднувач.</p> <p>2. – Цей термін застосовується тільки для роз'єднувачів високої напруги.</p>
<p><b>441-14-08 Centre-break disconnecter</b> A disconnecter in which both contacts of each pole are movable and engage at a point substantially midway between their supports.</p> <p><i>Note.</i> - This term applies to high-voltage disconnectors only.</p>	<p><b>441-14-08 Роз'єднувач з центральним розмиканням</b> Роз'єднувач, в якому обидва контакти кожного полюсу є рухомими та змикаються приблизно посередині між його опорами.</p> <p><i>Примітка.</i> – Цей термін застосовується тільки для роз'єднувачів високої напруги.</p>
<p><b>441-14-09 Double-break disconnecter</b> A disconnecter that opens a circuit at two points.</p>	<p><b>441-14-09 Роз'єднувач з подвійним роз'єднанням</b> Роз'єднувач, що роз'єднує коло у двох точках.</p>
<p><b>441-14-10 (mechanical) Switch</b> A mechanical switching device capable of making, carrying and breaking currents under normal circuit conditions which may include specified operating overload conditions and also carrying for a specified time currents under specified abnormal circuit conditions such as those of short circuit.</p>	<p><b>441-14-10 Вимикач (контактний)</b> Контактний комутаційний апарат, спроможний вмикати, проводити та вимикати струми при нормальних умовах у колі, у тому числі при обумовлених перевантаженнях, а також витримувати впродовж обумовленого часу струми при обумовлених ненормальних умовах у колі, таких, як коротке замикання.</p>



<i>Note.</i> - A switch may be capable of making but not breaking short-circuit currents.	<i>Примітка.</i> – Вимикач може бути спроможним вмикати, але не вимикати струми короткого замикання.
<b>441-14-11 Earthing switch</b> A mechanical switching device for earthing parts of a circuit, capable of withstanding for a specified time currents under abnormal conditions such as those of short circuit, but not required to carry current under normal conditions of the circuit.  <i>Note.</i> – An earthing switch may have a short-circuit making capacity.	<b>441-14-11 Перемикач заземлення</b> Контактний комутаційний апарат, що застосовується для заземлення частин кола, спроможний витримувати впродовж обумовленого часу струми при ненормальних умовах, таких як коротке замикання, але не обов'язково пристосований для проведення струму при нормальних умовах у колі. <i>Примітка.</i> – Перемикач заземлення може мати здатність до включення при короткому замиканні.
<b>441-14-12 Switch-disconnector</b> A switch, which, in the open position, satisfies the isolating requirements specified for a disconnector.	<b>441-14-12 Вимикач-роз'єднувач</b> Вимикач, який у вимкненому положенні задовольняє вимогам щодо ізоляції, що є визначеними для роз'єднувачів.
<b>441-14-13 Gas evolving switch</b> A switch in which the gas is evolved and moved by the thermal action of the arc.	<b>441-14-13 Автогазовий вимикач</b> Вимикач, у якому внаслідок термічної дії дуги витворюється та переміщується газ.
<b>441-14-14[15][16] Switch [Disconnector] [Switch-disconnector]-fuse</b> A switch [disconnector] [switch-disconnector] in which one or more poles have a fuse in series in a composite unit.	<b>441-14-14[15][16] Вимикач [Роз'єднувач] [Вимикач-роз'єднувач]-запобіжник</b> Комплектний апарат, що складається з вимикача [роз'єднувача] [вимикача-роз'єднувача], в одному або декількох полюсах якого встановлено послідовно приєднаний запобіжник.
<b>441-14-17[18][19] fuse-switch [fuse-disconnector] [fuse-switch-disconnector]</b> A switch [disconnector] [switch-disconnector] in which a fuse-link or a fuse-carrier with fuse-link forms the moving contact.	<b>441-14-17[18][19] Запобіжник-вимикач [Запобіжник-роз'єднувач] [Запобіжник вимикач-роз'єднувач]</b> Вимикач [роз'єднувач] [вимикач-роз'єднувач], у якому рухомий контакт утворюється вставкою або утримувачем зі вставкою запобіжника.
<b>441-14-20 Circuit-breaker</b> A mechanical switching device, capable of making, carrying and breaking currents under normal circuit conditions and also making, carrying for a specified time and breaking currents under specified abnormal circuit conditions such as those of short circuit.	<b>441-14-20 Розмикач</b> Контактний комутаційний апарат, здатний вмикати, проводити та вимикати струм при нормальних умовах у колі, а також вмикати, проводити впродовж обумовленого часу та вимикати струми при обумовлених ненормальних умовах у колі, таких як коротке замикання.
<b>441-14-21 Current-limiting circuit-breaker</b> A circuit-breaker with a break-time short enough to prevent the short-circuit current reaching its otherwise attainable peak value.	<b>441-14-21 Струмообмежувальний розмикач</b> Розмикач з часом вимкнення достатньо малим, щоб запобігти досягнення пікового значення струму короткого замикання.
<b>441-14-22 Integrally fused circuit-breaker</b> A combination, in a single device, of a circuit-breaker and fuses, one fuse being placed in series with each pole of the circuit-breaker intended to be connected to a phase conductor.	<b>441-14-22 Розмикач із вбудованим запобіжником</b> Комбінація розмикача та запобіжників в одному апараті, у якому кожний запобіжник встановлений послідовно з полюсом розмикача, призначеним для з'єднання з фазовим провідником.
<b>441-14-23 Circuit-breaker with lock-out preventing closing</b> A circuit-breaker in which none of the moving contacts can make current if the closing command is initiated while the conditions which should cause the opening operation remain established.	<b>441-14-23 Розмикач із блокуванням проти включення</b> Розмикач, у якому жодний з рухомих контактів за командою на вмикання не може ввімкнути струм, якщо залишаються умови, які можуть викликати вимикання.
<b>441-14-24 Moulded-case circuit-breaker</b> A circuit-breaker having a supporting housing of moulded insulating material forming an integral part of the circuit-breaker.	<b>441-14-24 Розмикач у литому (формованому) корпусі</b> Розмикач, корпус якого виготовлено з ізоляційного матеріалу, та складає єдине ціле з розмикачем.
<b>441-14-25 Dead tank circuit-breaker</b> A circuit-breaker with interrupters in an earthed metal tank.	<b>441-14-25 Розмикач із заземленим баком</b> Розмикач, комутаційні пристрої якого розміщені у металевому заземленому баку.
<b>441-14-26 Live tank circuit-breaker</b> A circuit-breaker with interrupters in a tank insulated from earth.	<b>441-14-26 Розмикач з незаземленим баком</b> Вимикач, у якому комутаційні пристрої розміщені в ізольованому від землі баку.
<b>441-14-27 Air circuit-breaker</b> A circuit-breaker in which the contacts open and close in air at atmospheric pressure.	<b>441-14-27 Повітряний розмикач</b> Розмикач, контакти якого розмикаються та замикаються у повітрі при атмосферному тиску.
<b>441-14-28 Oil circuit-breaker</b> A circuit-breaker in which the contacts open and close in oil.  <i>Note.</i> – Typical examples of oil circuit-breakers are live tank minimum oil circuit-breakers and dead tank bulk oil circuit-breakers.	<b>441-14-28 Масляний розмикач</b> Розмикач, контакти якого розмикаються та замикаються у маслі. <i>Примітка.</i> – Характерними прикладами масляних розмикачів є розмикачі з малим об'ємом масла у незаземленому баку та з великим об'ємом масла у заземленому баку.

<p><b>441-14-29 Vacuum circuit-breaker</b> A circuit-breaker in which the contacts open and close within a highly evacuated envelope.</p>	<p><b>441-14-29 Вакуумний розмикач</b> Розмикач, контакти якого розмикаються та замикаються в оболонці з високим вакуумом.</p>
<p><b>441-14-30 Gas-blast circuit-breaker</b> A circuit-breaker in which the arc develops in a blast of gas. <i>Note.</i> – Where the gas is moved by a difference in pressure established by mechanical means during the opening operation of the circuit-breaker, it is termed a single pressure gas-blast circuit-breaker. Where the gas is moved by a difference in pressure established before the opening operation of the circuit-breaker, it is termed a double pressure gas-blast circuit-breaker.</p>	<p><b>441-14-30 Розмикач з газовим дуттям</b> Розмикач, у якому дуга розвивається у потоці газу <i>Примітка.</i> – Якщо переміщення газу забезпечується різницею тиску, що створюється механічними засобами під час операції вимкнення розмикача, то його називають розмикачем з одним ступенем тиску стисненого газу. Якщо переміщення забезпечується різницею тиску, яка утворена ще до операції вимкнення розмикача, то його називають розмикачем з двома ступенями тиску стисненого газу.</p>
<p><b>441-14-31 Sulphur hexafluoride circuit-breaker ; SF<sub>6</sub> circuit-breaker</b> A circuit-breaker in which the contacts open and close in sulphur hexafluoride.</p>	<p><b>441-14-31 Елегазовий розмикач</b> Розмикач, контакти якого розмикаються та змикаються в елегазі (шестифтористій сірці).</p>
<p><b>441-14-32 Air-blast circuit-breaker</b> A gas-blast circuit-breaker in which the gas used is air.</p>	<p><b>441-14-32 Розмикач з повітряним дуттям</b> Розмикач з газовим дуттям, у якому газом є повітря.</p>
<p><b>441-14-33 (mechanical) Contactor</b> A mechanical switching device having only one position of rest, operated otherwise than by hand, capable of making, carrying and breaking currents under normal circuit conditions including operating overload conditions <i>Note.</i> - Contactors may be designated according to the method by which the force for closing the main contacts is provided.</p>	<p><b>441-14-33 Контакттор (механічний)</b> Контактний комутаційний апарат з лише одним сталим положенням, з не ручним приводом, який спроможний вмикати, проводити та вимикати струми у нормальних умовах кола, включаючи оперування в умовах перевантажень. <i>Примітка.</i> – Контакттори можуть відрізнятися у залежності від способу, яким забезпечується зусилля для вмикання головних контактів.</p>
<p><b>441-14-34 Latched contactor</b> A contactor, the moving elements of which are prevented by means of a latching arrangement from returning to the position of rest when the operating means are de-energized. <i>Notes 1.</i> – The latching, and the release of the latching, may be mechanical, electromagnetic, pneumatic, etc.  2. – Because of the latching, the latched contactor actually acquires a second position of rest and, according to the definition of a contactor it is not, strictly speaking, a contactor. However, since the latched contactor in both its utilization and its design is more closely related to contactors in general than to any other classification of switching device, it is considered proper to require that it complies with the specifications for contactors wherever they are appropriate.</p>	<p><b>441-14-34 Контакттор із заціпкою</b> Контакттор, рухомі елементи якого утримуються від повертання у сталє (початкове) положення в умовах відсутності подачі енергії на засоби оперування. <i>Примітка 1.</i> – Заціплення та вивільнення від заціпки може здійснюватися механічними, електромагнітними, пневматичними та іншими засобами. 2. – У зв'язку з наявністю заціпки, контакттор фактично набуває другого сталого положення і, згідно з визначенням контакттора, він, строго кажучи, не є контакттором. Проте, враховуючи, що контакттор з заціпкою, за його застосуванням та конструкцією, ближче відноситься до контактторів, аніж до будь-якого іншого комутаційного апарату, доцільно вимагати, щоб він відповідав технічним умовам на контакттори там, де вони застосовуються.</p>
<p><b>441-14-35 Contactor relay</b> A contactor used as a control switch.</p>	<p><b>441-14-35 Допоміжний контакттор</b> Контакттор, що застосовуються як апарат кіл керування.</p>
<p><b>441-14-36 Instantaneous contactor relay</b> A contactor relay operating without any intentional time delay. <i>Note.</i> – Unless otherwise stated, a contactor relay is an instantaneous contactor relay.</p>	<p><b>441-14-36 Допоміжний контакттор миттєвої дії</b> Допоміжний контакттор, який спрацьовує без навмисної витримки часу. <i>Примітка.</i> – Якщо немає додаткових вказівок, то допоміжний контакттор є контакттором миттєвої дії.</p>
<p><b>441-14-37 Time-delay contactor relay</b> A contactor relay with specified time-delay characteristics.  <i>Note.</i> – The time-delay may be associated with energization ("e" delay) or with de-energization ("d" delay) or both.</p>	<p><b>441-14-37 Допоміжний контакттор з витримкою часу</b> Допоміжний контакттор з обумовленими характеристиками витримки часу. <i>Примітка.</i> – Витримка часу може бути пов'язана з подачею енергії (витримка "e") або з припиненням подачі енергії (витримка "d") або з тим та іншим.</p>
<p><b>441-14-38 Starter</b> The combination of all the switching means necessary to start and stop a motor in combination with suitable overload protection. <i>Note.</i> – Starters may be designated according to the method by which the force for closing the main contacts is provided.</p>	<p><b>441-14-38 Пускач</b> Комбінація всіх комутаційних засобів, необхідних для пуску та зупинки двигуна у поєднанні з належним захистом від перевантажень. <i>Примітка.</i> – Пускачі можуть розрізнятися у залежності від способу забезпечення зусилля, необхідного для замикання головних контактів.</p>
<p><b>441-14-39 Manual starter</b> A starter in which the force for closing the main contacts is provided exclusively by manual energy.</p>	<p><b>441-14-39 Ручний пускач</b> Пускач, у якому зусилля, необхідне для замикання головних контактів, забезпечується тільки м'язовою енергією.</p>

<p><b>441-14-40 Direct-on-line starter</b> A starter which connects the line voltage across the motor terminals in one step.</p>	<p><b>441-14-40 Одноступінчастий пускач</b> Пускач, який подає напругу мережі на затиски двигуна шляхом одноступінчастої операції.</p>
<p><b>441-14-41 N-step starter</b> A starter in which there are (n - 1) intermediate accelerating positions between the off and full on positions.</p>	<p><b>441-14-41 N-ступінчастий пускач</b> Пускач, який має (n - 1) проміжне положення прискорення між положеннями відключення та повного включення.</p>
<p><b>441-14-42 Rheostatic starter</b> A starter utilizing one or several resistors for obtaining, during starting, stated motor torque characteristics and for limiting the current</p>	<p><b>441-14-42 Реостатний пускач</b> Пускач, у якому використовується один чи декілька резисторів для отримання під час пуску необхідних характеристик двигуна та для обмеження струму.</p>
<p><b>441-14-43 Rheostatic rotor starter</b> A rheostatic starter for an asynchronous wound-rotor motor which, during the starting period, cuts out successively one or several resistors previously provided in the rotor circuit.</p>	<p><b>441-14-43 Реостатний роторний пускач</b> Реостатний пускач для асинхронного двигуна з фазним ротором, який під час пуску відключає послідовно один чи декілька резисторів, які попередньо були ввімкнені у коло ротора.</p>
<p><b>441-14-44 Star-delta starter</b> A starter for a three-phase induction motor such that in the starting position the stator windings are connected in star and in the final running position they are connected in delta.</p>	<p><b>441-14-44 Пускач «зірка-трикутник»</b> Пускач для трифазного асинхронного двигуна, у якому на початку пуску обмотки статора з'єднані зіркою, а під час роботи – трикутником.</p>
<p><b>441-14-45 Auto-transformer starter</b> A starter for an induction motor which uses for starting one or more reduced voltages derived from an auto-transformer</p>	<p><b>441-14-45 Автотрансформаторний пускач</b> Пускач для асинхронного двигуна, який використовує для пуску одну чи декілька знижених напруг, отримуваних від автотрансформатора.</p>
<p><b>441-14-46 Control switch (for control and auxiliary circuits)</b>  A mechanical switching device which serves the purpose of controlling the operation of switchgear or controlgear, including signalling, electrical interlocking, etc.  <i>Note.</i> – A control switch consists of one or more contact elements with a common actuating system.</p>	<p><b>441-14-46 Перемикач керування (для кіл керування та допоміжних кіл)</b> Контактний комутаційний апарат, який служить для керування операціями комутаційної апаратури або апаратури керування, у том числі сигналізацією, електричним блокуванням тощо. <i>Примітка.</i> – Перемикач кіл керування містить один чи декілька контактних елементів та спільну привідну систему.</p>
<p><b>441-14-47 Rotary (control) switch</b> A control switch having an actuator intended to be operated by rotation.</p>	<p><b>441-14-47 Поворотний перемикач (керування)</b> Перемикач керування з органом керування, що приводиться у дію шляхом обертання його вала.</p>
<p><b>441-14-48 Pilot switch</b> A non-manual control switch actuated in response to specified conditions of an actuating quantity. <i>Note.</i> – The actuating quantity may be pressure, temperature, velocity, liquid level, elapsed time, etc.</p>	<p><b>441-14-48 Керований перемикач</b> Перемикач кіл керування, який приводиться у дію без участі людини при обумовлених межах параметрів впливу. <i>Примітка.</i> – Параметрами впливу, можуть бути тиск, температура, швидкість, рівень рідини, час, тощо.</p>
<p><b>441-14-49 Position switch</b> A pilot switch the actuating system of which is operated by a moving part of a machine, when this part reaches a predetermined position.</p>	<p><b>441-14-49 Позиційний перемикач</b> Керований перемикач, привідна система якого приводиться у дію рухомою частиною машини, коли ця частина досягає заданого положення.</p>
<p><b>441-14-50 Limit switch</b> A position switch having positive opening operation.</p>	<p><b>441-14-50 Кінцевий перемикач</b> Позиційний перемикач з повною операцією відключення.</p>
<p><b>441-14-51 Proximity switch</b> A position switch which is operated without mechanical contact with the moving part.</p>	<p><b>441-14-51 Безконтактний позиційний перемикач</b> Позиційний перемикач, який спрацьовує без механічного контакту з рухомою частиною.</p>
<p><b>441-14-52 Foot switch</b> A control switch having an actuator intended to be operated by foot.</p>	<p><b>441-14-52 Педальний перемикач</b> Перемикач керування, орган керування якого призначений для оперування ногою.</p>
<p><b>441-14-53 Push-button</b> A control switch having an actuator intended to be operated by force exerted by a part of the human body, usually the finger or palm of the hand, and having stored energy (spring) return.</p>	<p><b>441-14-53 Кнопковий перемикач</b> Перемикач керування, орган керування якого призначений для оперування зусиллям частини людського тіла, зазвичай, пальцем або долонею руки, з повертанням у вихідне положення за рахунок накопиченої енергії (пружини).</p>

Надійшла 20.02.2007

## СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЦИП СИММЕТРИИ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Конохов Н.Н., к.т.н., доц.

Донецкий институт железнодорожного транспорта

Украина, 83018, Донецк, ул. Горная 6, ДонИЖТ, каф. "ЕСЕ"

тел. (062) 319-01-466 319-08-30, e-mail: eltechdrti@yandex.ru

*Розглянута історія теорії систем і теорії симетрії та їх застосування до аналізу окремих вузлів і елементів електричних машин (ЕМ). Із загальної позиції теорії систем та теорії симетрії розглянуті проблеми удосконалення конструкції ЕМ. Аналізуються переваги розвитку конструкції ЕМ з радіально-аксіальною системою охолодження (символ симетрії n:t) перед ЕМ з аксіальною системою охолодження (символ симетрії t).*

*Рассмотрена история теории систем и теории симметрии и их применения для анализа отдельных элементов и узлов электрических машин (ЭМ). С общей позиции теории систем и теории симметрии рассмотрены проблемы совершенствования конструкции ЭМ. Анализируются преимущества развития конструкции ЭМ с радиально-аксиальной системой охлаждения (символ симметрии n:t) перед ЭМ с аксиальной системой охлаждения (символ симметрии t).*

### ВВЕДЕНИЕ

Теория систем и теория симметрии имеют каждая свою историю и относительно недавно стали применяться для анализа технических систем.

Понятия "система" и "системный анализ" в научные исследования ввели философы, биологи и психологи: в 30-е годы XX века философия явилась источником возникновения общественного направления, названного теорией систем [1]. Уже в 60-е годы появился термин "системотехника" (Темников Ф.Е.) для технических направлений. Для других направлений стали использовать термин "системология" (Новиков И.Б.), а для задач управления – термин "кибернетика". В последние годы можно отметить появление даже специальных учебников по "Теории технических систем" [2].

Разработка же теории симметрии и осознание методологической значимости принципа симметрии имеет более давнюю историю [3]. Еще в конце XIX века П. Кюри писал о "симметрии электрического и магнитного полей", переосмысливая классическое понятие, переводя его с философского уровня на методологический. В 1907 году в лекциях проф. Вульфа Г.В., изданных в России отдельной книжкой "Симметрия и ее проявления в природе", отмечается общность законов симметрии в мире живых организмов и в неорганической природе.

Академик В.И. Вернадский в 20-х годах в серии своих работ развивает идеи о широком научном значении принципа симметрии, оценивая симметрию как "основной принцип понимания сущего". В 1939 году ученик Вульфа академик А.В. Шубников публикует статью "Правило Ампера и симметрия мира", где отстаивает общий характер симметрии физических явлений, а затем совместно с профессором В.А. Копчиком во втором издании своей книги "Симметрия" обобщает достижения в области учения о симметрии [4].

В 70-90 годах уже появляются отдельные работы, посвященные симметрии в технике и технологии [5-7]. Например, в [6] проблема симметрии обсуждается как предпосылка к созданию теории художественного конструирования в технике и машиностроении. Отмечается, что "В технике (в конструировании) симметрия означает такой принцип организации элементов композиции, когда их взаимное расположение дает возможность говорить о присутствии оси симметрии, плоскости симметрии или других признаков симметрии".

В предисловии к [4] заключается, что "Симмет-

рия, рассматриваемая как закон строения структурных объектов, сродни гармонии. В способности ощущать ее там, где другие ее не чувствуют, и состоит, по нашему мнению, вся эстетика научного и художественного творчества".

Таким образом, несмотря на разный возраст теории систем и теория симметрии начали применяться для анализа технических систем примерно в одно время: в 70е - 80е годы XX столетия, а для теоретических исследований ЭМ они начали применяться еще позже и раздельно. Например, при разработки и создании в 90-е годы единой международной серии асинхронных двигателей (АД) стран СЭВ "Интер-электро" уже применялся системный анализ [8]. Причем, при разработке уникальной серии системный анализ применяли как для типично большой системы, включающей в себя проектирование, прогнозирование и планирование.

В качестве примера применения теории симметрии для анализа подсистемы ЭМ (электрических обмоток) можно привести ряд работ профессора Дегтева В.Г. [9, 10, 11 и др.].

### ЦЕЛЬ ПУБЛИКАЦИИ

В данной работе автор делает, как ему кажется, первую попытку обобщить на основании системного анализа опыт применения принципа симметрии к анализу конструкции наиболее распространенных ЭМ, какими являются АД.

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИММЕТРИИ К АНАЛИЗУ КОНСТРУКЦИИ ЭМ

Системный анализ, как метод поиска путей развития технических систем, представляет значительный конструкторский интерес, т.к. по определению в [12] "Системный анализ – есть прикладная диалектика", превращение проблемы в проблематику.

Если рассматривать ЭМ как структурный объект, систему, состоящую из разнородных элементов [1], то такую систему можно представить.

$$S_{ЭМ} \equiv \langle \mathcal{E}, И, М, К, ТВ, R, Z \rangle, \quad (1)$$

где  $S_{ЭМ}$  – система (электромеханическая) ЭМ;  $\mathcal{E}, И, М, К, ТВ$  – электрические, изоляционные, магнитные, конструктивные, тепловентиляционные элементы типа  $A = \{a_i\}$ ;  $R = \{r_i\}$  – связи между элементами системы;  $Z$  – цель.

Модель системы АД (1), необходимая для дальнейшего анализа, представлена на рис. 1.

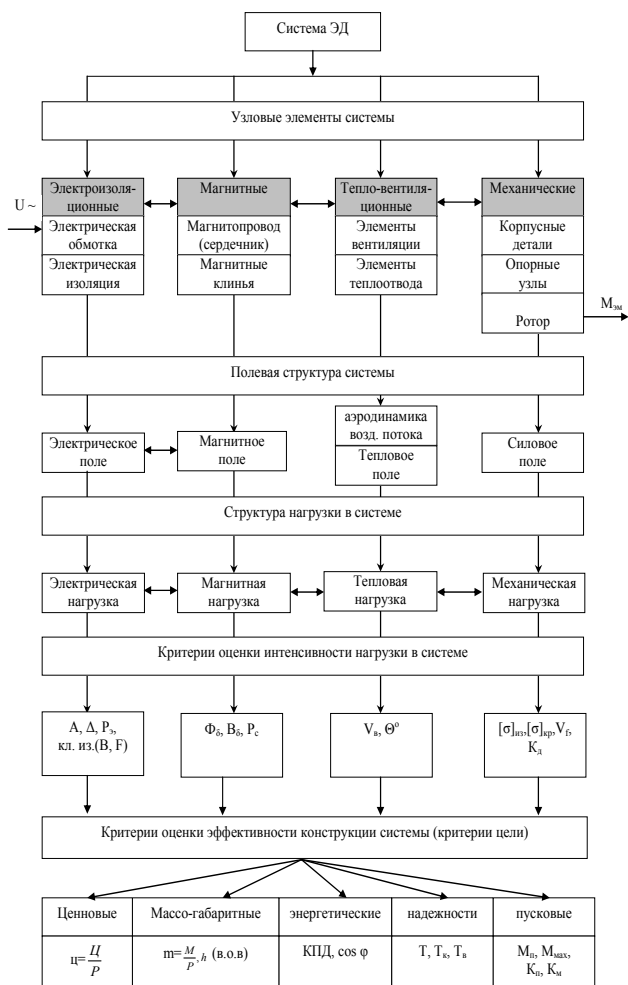


Рис. 1. Модель системы асинхронного двигателя

Рассмотрим возможности применения теории симметрии к анализу конструкции узловых элементов системы ЭД в соответствии с этим рисунком.

Как уже отмечалось достаточно разработанной является теория симметрии для подсистемы ЭМ – электрических обмоток. Применение проф. Дегтевым В.Г. аналитического аппарата классической теории симметрии позволило ему не только дать теоретическое толкование, адекватное понятию "симметрия многофазной обмотки", но и производить научно обоснованный анализ и синтез обмоток ЭМ. К недостатку публикаций [9, 10, 11] следует отнести отсутствие примеров применения теоретических исследований для совершенствования обмоток конкретных типов ЭМ и новых их разработок.

В отношении подсистемы магнитных элементов – магнитопроводов теория симметрии могла бы, например, дать объяснение рекомендациям по выбору соотношения числа пазов статора и ротора  $Z_1/Z_2$ , которые до сих пор не имеют теоретического обоснования, а были получены подбором лучших соотношений опытным путем. Также преимущества применения магнитных клиньев более полно могут быть объяснены с позиции теории симметрии.

В отношении конструктивных элементов имеются отдельные указания в плане общего машиностроения, например [6], на то, что конструкция, обладающая весовой и геометрической симметрией, имеет суженный спектр частот собственных колебаний. Поэтому рассмотрение и анализ вопросов вибрации и механического и аэродинамического шума ЭМ с при-

менением теории симметрии может дать новые подходы к решению этих проблем. В качестве сравнительного примера разрешения технических противоречий при создании аксиально-упругих подшипниковых узлов для ЭМ [13] можно привести дисимметричную (символ симметрии  $n$ ) конструкцию прототипа [14] и симметричную (символ симметрии  $n : m$ ) конструкцию изобретения по патентам РФ [15], разработанных для снижения виброактивности и динамических нагрузок в подшипниковых узлах АД серии ВА02 мощностью свыше 500 кВт.

### КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРИНЦИПА СИММЕТРИИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИИ АД

Практический интерес представляет применение принципа симметрии к анализу тепло-вентиляционной подсистемы АД – системе охлаждения (СО), т.к. конструктивные и технологические резервы развития АД к концу XX столетия практически были исчерпаны.

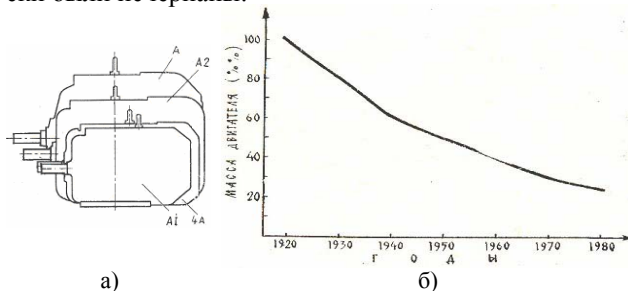


Рис. 2. Сравнительные габариты АД разных серий (а) и график уменьшения их массы по годам (б) [8]

Как было показано в работах [16, 17] для средних и крупных закрытых (взрывозащищенных) АД именно системное решение СО определяет "конструктивный скелет" всего электродвигателя.

Классическим является примерно пропорциональное снижение массы и габарита АД при их очередном совершенствовании (рис. 2). Обратимся к последним достижениям западных фирм, т.н. евродвигателям, под которые создана прогрессивная шкала МЭК: эти двигатели имеют более низкую высоту оси вращения (в.о.в.) в сравнении с аналогичными отечественными взрывозащищенными (закрытыми) АД серии ВА02, ВА04, 1ВА0, ВАД, ВА05К, ВА05П, ДА304 и др. (рис. 3).

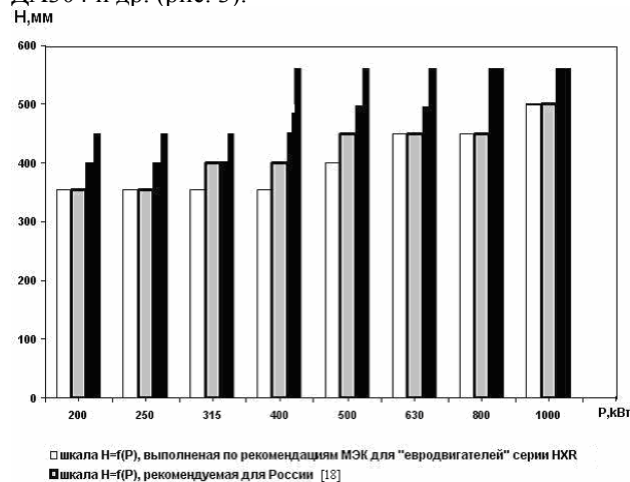


Рис. 3. Шкала высоты оси вращения  $h = f(P)$  для закрытых В/В АЭД (исп. IP44) при  $2p=4$  в диапазоне мощностей 200-1000 кВт

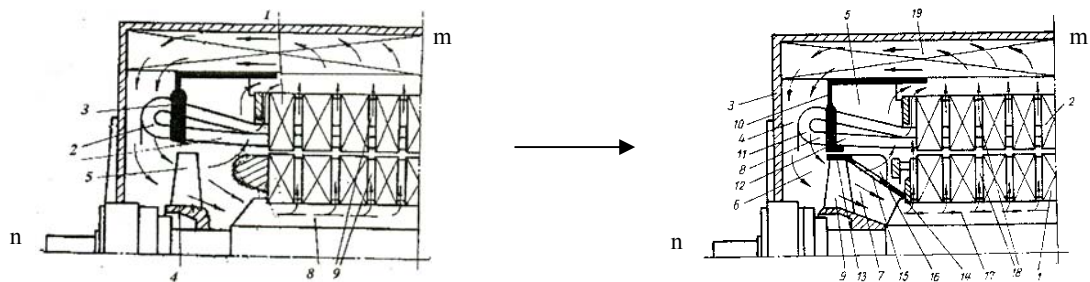


Рис. 4. Предлагаемое решение (одно из нововведений) развития симметричной конструкции от серии ВА02 к серии ВА05 [20]

Однако такое сравнение (а, следовательно, и преимущество) евродвигателей не является корректным, потому, что снижение в.о.в. ( $h$ ) достигнуто не пропорционально со снижением удельной массы  $m$  (см. рис. 1, масса - габаритные критерии  $m$  и  $h$ ), а искусственным удлинением ("растягиванием") ЭД т.е. путем изменения пропорций между длиной и высотой АД. Вопрос о соотношении главных размеров  $L/D$  и пропорциях ЭД следует рассмотреть отдельно с учётом общей теории пропорций [19]. В работах [16, 17] было показано, что чем в большей степени удлиняется двигатель по сравнению с классическим отношением  $L/D$ , тем больше дисимметрия СО, больше перекокс температуры по длине обмотки статора и, следовательно, больше проигрыш в эффективности охлаждения ЭМ. С позиции теории симметрии "длинные" двигатели требуют аксиальной СО (символ симметрии  $n$ ) и продольного обтекания труб и каналов охлаждения, а классические ЭМ могут развиваться по более симметричной аксиально-радиальной СО (символ симметрии  $n : m$ ), сохраняющей преимущества поперечного, радиального обтекания труб и каналов охлаждения. Больше того, сохраняя поперечную плоскость зеркальной симметрии  $m$  (и желательно не только для внутренней, но и для внешней схемы охлаждения) можно создавать новые конструктивные решения СО для средних и крупных АД [17]. Для иллюстрации на рис. 4 показан, например, один из усовершенствованных узлов СО [20], предназначенный для новой серии ВА05[21], - в сравнении с СО АД серии ВА02 [22]. Важно отметить и то, что новые СО, которые могут быть созданы с использованием принципа симметрии, отличаются многовариантностью [16, 17], могут придавать новый патентоспособный внешний вид (дизайн) ЭМ и сериям отечественных АД в целом.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. К концу XX столетия, как отмечалось в [8], из конструкции ЭМ и материалов было "выжато" почти все (см. рис. 2 б).

2. Целый ряд "новых" серий высоковольтных ЭД, созданных в начале XI века (ВА04, 1ВА0, ВАД, ВА05К, ВА05П) практически не имеют преимуществ по массо-габаритным показателям перед ЭД серии ВА02 (созданных в 70-е годы).

3. Поэтому необходимые новые конструктивные решения могут быть найдены с использованием нетрадиционных для ЭМ теорий: теории систем и теории симметрии.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Финаев В.И., Глод О.Д. Основы теории систем: Учебное пособие, Таганрог: издательство ТРТУ, 2000, -68 с.  
 [2] Голубенко А.Л. Петров А.С. Кашура А.Л. Теория технических систем. Учебное пособие. К. из-во "Аристей", 2004.  
 [3] Овчинников Н.Ф. Симметрия – закономерность при-

роды и принцип познания // Принцип симметрии. – М.: Наука, 1978. – С. 4-38.

[4] Шубников А.В., Копчик В.А. Симметрия в науке и искусстве. – М.: Наука, 1972. – 340 с.  
 [5] Повилейко Р.П. Симметрия в технике. Новосибирск, 1974.  
 [6] Повилейко Р.П. Симметрия в технике // Принцип симметрии. – М.: Наука, 1978. – С. 335-351.  
 [7] Дурнев В.Д., Талашкевич И.П. Симметрия в технологии. – СПб.: Политехника, 1993 – 256 с.  
 [8] Радин В. Рождение серии. Наука и техника. 1985, С. 38-44.  
 [9] Дегтев В.Г. Синтез симметричных трехфазных обмоток с заданным уровнем избирательности // Электричество - 1993 - №4. - С. 40-44.  
 [10] Дегтев В.Г. Симметрия и свойства многофазных обмоток // Электротехника і електромеханіка. - 2002.-№1. - С. 23-27.  
 [11] Дегтев В.Г., Шульгин Д.Н. Свойства многофазных обмоток с максимальной симметрией // Электротехніка і електромеханіка.- 2005 - №1.- С. 38-40.  
 [12] Перегудов Ф.И. Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. –М.: ВШ, 1989.  
 [13] Конохов Н.Н. Разработка и применение аксиально-упругих подшипниковых узлов в электрических машинах // Труды респ. школы – семинара молодых ученых: Повышение эффективности генерирования, передачи и использования электроэнергии. Алушта, ноябрь 1985-ИЭД АН УССР, Киев. – 1987. С. 2-9  
 [14] Авт. св. СССР № 509949. Устройство для крепления подшипника ротора электрической машины // А.Д. Глушенко, В.Е. Верхогляд, А.Д. Беленький и др., 1976 г.  
 [15] Патент РФ № 792497. Подшипниковый узел электрической машины // Н.Н. Конохов, Е.В. Останкович и др., 1993  
 [16] Конохов Н.Н. Об отечественной концепции развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей типа ВА02.//Труды симпозиума "Элмаш-2004", МА "Интерэлектромаш", Москва, октябрь 2004-177, т.2, С. 21-26.  
 [17] Конохов Н.Н. Анализ концепций развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей // Электротехніка і електромеханіка.-2005. -№1- С. 47-50.  
 [18] Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования // Гольдберг О.Д. и др. – М.: Высш. школа, 2001 – 512 с.  
 [19] Повилейко Р. Архитектура машины. – Зап. – Сиб. кн. отд., 1974, -95 с.  
 [20] Обоснование создания новой серии высоковольтных взрывозащищенных электродвигателей ВА05. Технический отчет ПИЖЦ 520058.00, рук. к.т.н. Конохов Н.Н., УкрНИИВЭ, г. Донецк, 1996г. 11 с.  
 [21] Патент РФ №1725322. Электрическая машина // Конохов Н.Н., Збарский Л.А. Бурковский А.Н. Ширшин И.Г., 1993 г.  
 [22] Авт. св. СССР №838922. Электрическая машина // Збарский Л.А., Конохов Н.Н., Макагон В.А. Поршневу Ю.В. Ширшин И.Г., 1981 г.

Поступила 22.09.2006

## ІНТЕГРАЛЬНІ РІВНЯННЯ В МОДЕЛЮВАННІ КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Мороз В.І., к.т.н., доц.

Національний університет "Львівська політехніка"

Україна, 79013, Львів, вул. Ст. Бандери, 12, НУ "Львівська політехніка",

кафедра "Електропривод і автоматизація промислових установок"

тел. (032) 258-26-20, e-mail: vmoroz@polynet.lviv.ua

*У статті на прикладі показано використання інтегральних рівнянь у моделюванні керованих електромеханічних систем. З використанням неявних формул Адамса проведено аналіз точності та раціонального порядку формули числового інтегрування.*

*В статті на прикладі показано використання інтегральних рівнянь в моделюванні управляємих електромеханічних систем. С використанням неявних формул Адамса проведено аналіз точності та раціонального порядку формули численного інтегрування.*

*Дана стаття з'явилася внаслідок  
бесід з проф. Р.В. Фільцом, якому автор  
вдячний за підтримку та розуміння.*

### ВСТУП

Опис динамічних властивостей електромеханічних систем, у тому числі автоматизованих електроприводів, традиційно здійснюється диференціальними рівняннями. Такий підхід має ряд недоліків у порівнянні із застосуванням інтегральних рівнянь для опису динамічних процесів [1], [2]:

- 1) Під час диференціювання функції втрачається частина інформації (для диференціального рівняння першого порядку – початкові умови), у той же час в інтегральному рівнянні початкові умови є невід'ємною частиною рівняння.
- 2) При розв'язуванні диференціального рівняння, на відміну від інтегрального, за допомогою класичних числових методів нерідко виникає проблема числової нестійкості.

Якоюсь мірою ці положення підтверджуються практикою теорії автоматичного керування (ТАК) і практикою налагодження автоматизованих електроприводів – введення до системи диференціатора часто спричинює проблеми через посилення диференціатором високочастотних завад і шумів.

Незважаючи на низку переваг, застосування інтегральних рівнянь для опису динаміки електромеханічних систем не отримало такого розповсюдження, як використання диференціальних рівнянь. Залишаються відкритими такі питання, як раціональний порядок методу числового інтегрування, спосіб визначення локальної похибки під час моделювання електромеханічних систем.

Таким чином, метою проведених досліджень є:

- визначення раціонального порядку числового інтегратора для моделювання динаміки керованих електромеханічних систем, зокрема, сучасних автоматизованих електроприводів;
- знаходження способу визначення локальних похибок під час числового розв'язування інтегральних рівнянь, що описують динаміку електромеханічної системи.

Розглянемо застосування підходу з використанням інтегральних рівнянь на досить простому прикладі розрахунку динаміки двох режимів двигуна постійного струму (ДПС) незалежного збудження: прямого

пуску і накидання навантаження. Вибір такого прикладу пояснюється простою можливістю аналітичної перевірки отриманих результатів, а знайдені закономірності можуть бути поширені на складніші системи.

Якірне коло ДПС можна зобразити заступною електричною схемою (рис. 1), що описується рівняннями електричної рівноваги:

$$U_a - C\omega - U_{La} - i_a R_a = 0;$$

$$i_a = i_a(0) + \frac{1}{L_a} \int_0^t U_{La} dt,$$

де  $U_{La}$  – напруга на індуктивності якірного кола.

Перейшовши до якірного струму як до однієї з основних змінних, матимемо

$$i_a(t) = i_a(0) + \frac{1}{L_a} \int_0^t (U_a - C \cdot \omega(t) - i_a(t) \cdot R_a) dt. \quad (1)$$

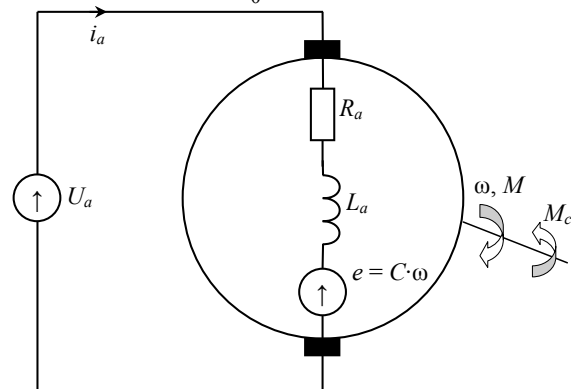


Рис. 1. Заступна електрична схема якірного кола ДПС незалежного збудження:

$U_a$  – напруга на якорі двигуна;  $i_a$  – струм якірного кола;  $L_a$  – індуктивність якірного кола;  $R_a$  – опір якірного кола;  $e$  – ЕРС якоря;  $C$  – стала двигуна;  $\omega$  – кутова швидкість якоря;  $M$  – електромагнітний момент;  $M_c$  – момент статичного опору

До цього рівняння додамо інтегральне рівняння динаміки механічної частини приводу, що описує залежність кутової швидкості ДПС від часу:

$$\omega(t) = \omega(0) + \frac{1}{J} \int_0^t (C \cdot i_a(t) - M_c) dt. \quad (2)$$

Таким чином, режим прямого пуску двигуна постійного струму описуватиметься системою інтегральних рівнянь (3)

$$\begin{cases} i_a(t) = i_a(0) + \frac{1}{L_a} \int_0^t (U_a - C \cdot \omega(t) - i_a(t) \cdot R_a) dt; \\ \omega(t) = \omega(0) + \frac{1}{J} \int_0^t (C \cdot i_a(t) - M_c) dt, \end{cases} \quad (3)$$

яка доволі просто розв'язується за допомогою відомих числових методів наближеного обчислення означеного інтегралу, зокрема, методу трапецій:

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} f(x) dx \approx \sum_{i=0}^{N-1} h \cdot \left( \frac{f_i + f_{i+1}}{2} \right), \quad (4)$$

де  $[t_{\min}; t_{\max}]$  – інтервал інтегрування;  $h = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{N}$  – крок інтегрування;  $N$  – число точок розбиття інтервалу інтегрування.

Застосувавши згаданий числовий метод (4) до системи інтегральних рівнянь (3), отримаємо систему неявних рекурентних рівнянь, що описують динамічні режими ДПС:

$$\begin{cases} i_{a_{i+1}} = i_{a_i} + \frac{h}{2L_a} \cdot (U_{a_{i+1}} + U_{a_i} - C \cdot (\omega_{i+1} + \omega_i) - R_a \cdot (i_{a_{i+1}} + i_{a_i})); \\ \omega_{i+1} = \omega_i + \frac{h}{2J} \cdot (C \cdot (i_{a_{i+1}} + i_{a_i}) - (M_{c_{i+1}} + M_{c_i})). \end{cases} \quad (5)$$

Ввівши позначення  $T_a = L_a/R_a$  і розв'язуючи систему неявних рівнянь (5) відносно змінних  $i_{a_{i+1}}$  та  $\omega_{i+1}$ , матимемо систему явних рекурентних рівнянь для опису часових процесів для струму якоря та кутової швидкості двигуна постійного струму:

$$\begin{cases} i_{a_{i+1}} = \frac{2R_a \cdot J \cdot (2T_a - h) \cdot i_{a_i} + h \cdot (2J \cdot (U_{a_{i+1}} + U_{a_i} - \dots - 2C \cdot \omega_i) + h \cdot C \cdot (M_{c_{i+1}} + M_{c_i} - C \cdot i_{a_i}))}{C^2 \cdot h^2 + 2R_a \cdot J \cdot (2T_a + h)} \\ \omega_{i+1} = \frac{h \cdot C \cdot (h \cdot (U_{a_{i+1}} + U_{a_i} - C \cdot \omega_i) + 4T_a R_a \cdot i_{a_i}) + \dots + R_a \cdot (2T_a + h)(2J \cdot \omega_i - h \cdot (M_{c_{i+1}} + M_{c_i}))}{C^2 \cdot h^2 + 2R_a \cdot J \cdot (2T_a + h)}. \end{cases} \quad (6)$$

У випадку послідовної програмної реалізації алгоритму (спочатку обчислюють значення струму  $i_{a_{i+1}}$ , а потім – значення швидкості  $\omega_{i+1}$ ), можна скористатися простішим варіантом системи рівнянь (6):

$$\begin{cases} i_{a_{i+1}} = \frac{2R_a \cdot J \cdot (2T_a - h) \cdot i_{a_i} + h \cdot (2J \cdot (U_{a_{i+1}} + U_{a_i} - \dots - 2C \cdot \omega_i) + h \cdot C \cdot (M_{c_{i+1}} + M_{c_i} - C \cdot i_{a_i}))}{C^2 \cdot h^2 + 2R_a \cdot J \cdot (2T_a + h)} \\ \omega_{i+1} = \omega_i + \frac{h}{2J} \cdot (C \cdot (i_{a_{i+1}} + i_{a_i}) - (M_{c_{i+1}} + M_{c_i})). \end{cases} \quad (6a)$$

Як приклад, для двигуна постійного струму незалежного збудження з параметрами:

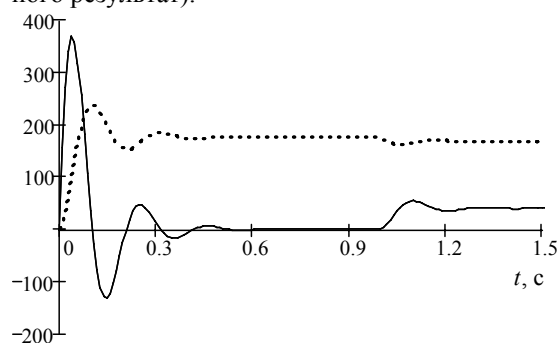
- номінальна напруга якоря двигуна  $U_a^{\text{ном}} = 220$  В;
- стала двигуна  $C = 2.5$  В·с<sup>-1</sup>;
- активний опір якорного кола  $R_a = 0.25$  Ом;
- електромагнітна стала часу якорного кола  $T_a = 0.05$  с;
- сумарний момент інерції приводу  $J = 0.5$  кг·м<sup>2</sup>;
- електромеханічна стала часу  $T_{\text{ем}} = \frac{J \cdot R_a}{C^2} = 0.02$  с;

- номінальний момент навантаження (статичного опору)  $M_c^{\text{ном}} = 100$  Нм,
- за формулами (6) для кроку інтегрування  $h = 0.01$  с проведено розрахунки перехідних процесів режимів прямого пуску для номінальної напруги на якорі  $U_a^{\text{ном}}$  та накидання номінального навантаження  $M_c^{\text{ном}}$  після розгону до номінальної швидкості  $\omega_{\text{ном}}$  (рис. 2).

### СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ

Підвищити точність розв'язування інтегральних рівнянь числовими методами можна двома способами:

- 1) зменшенням кроку (цілком очевидний спосіб) – менш економічний, на перший погляд, у зв'язку з пропорційним зростанням обчислювальних витрат;
- 2) підвищенням порядку формули числового інтегрування (потрібно застосовувати з обережністю, бо, як показали числові експерименти, для великих значень кроку може дати протилежний до очікуваного результат).



— струм якоря  
 ..... швидкість (x2)  
 Рис. 2. Результати розрахунку за формулами (6) для кроку  $h = 0.01$  с

Порівняти ефективність обох способів можна зіставляючи отримані результати з аналітичним розв'язком, що для наведеної лінійної системи знаходиться доволі просто – наприклад, із застосуванням прямого і оберненого перетворень Лапласа. Для одержаних вище рекурентних формул (6) слід очікувати другого порядку точності, тобто, зі зменшенням кроку вдвічі точність зростає у 4 рази, що підтверджується числовим експериментом (рис. 3), проведеним для двох значень кроку  $h = 0.02$  і  $0.04$  с.

### ФОРМУЛИ ІНТЕГРУВАННЯ ВИЩОГО ПОРЯДКУ

Виведення формул інтегрування є нескладною та відомою процедурою (особливо, із застосуванням комп'ютерних пакетів аналітичної математики): за  $n$  рівновіддаленими на крок  $h$  точками будується апроксимаційний поліном

$$a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \dots + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0.$$

Далі знаходиться первісна (інтеграл) апроксимуючого полінома для проміжку  $[x_i; x_{i+1}]$ . Хід знаходження формули інтегрування показано нижче на прикладі формули третього порядку (використовуються три точки) (див. рис. 4).

- 1) Задається апроксимаційний поліном другого порядку:  $P(x) = a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$ .



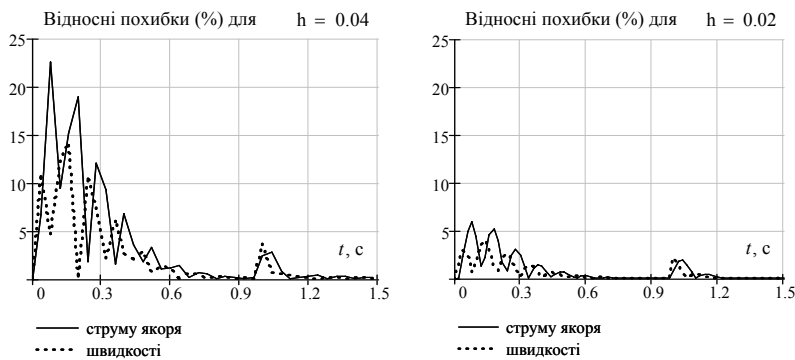


Рис. 3. Графіки похибок методу трапецій для двох значень кроку інтегрування

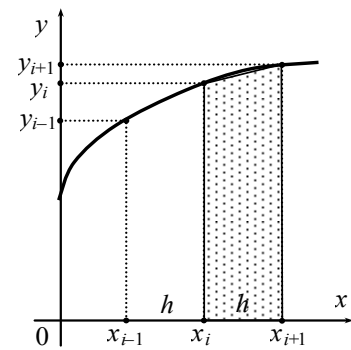


Рис. 4. Ілюстрація процесу побудови формули числового інтегрування третього порядку

2) За рівновіддаленими на крок  $h$  трьома точками аргументу  $x_{i-1}, x_i, x_{i+1}$  та відповідними їм абсцисами  $y_{i-1}, y_i, y_{i+1}$  знаходяться коефіцієнти апроксимуючого полінома:

$$\begin{cases} a_2 h^2 + a_1 h + a_0 = y_{i+1}; \\ a_0 = y_i; \\ a_2 h^2 - a_1 h + a_0 = y_{i-1}; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_0 = y_i; \\ a_1 = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h}; \\ a_2 = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{2h^2}. \end{cases}$$

3) Знаходиться первісна полінома:

$$\int P(x) dx = a_2 \frac{x^3}{3} + a_1 \frac{x^2}{2} + a_0 x + C.$$

4) Підставивши в одержану формулу первісної раніше знайдені в п. 2 значення коефіцієнтів полінома і значення сталої інтегрування  $C$  (дорівнює нулеві), отримуємо формулу інтегрування, відому, як неявна формула Адамса третього порядку:

$$I_{i+1} = I_i + \frac{h}{12}(5y_{i+1} + 8y_i - y_{i-1}),$$

де  $I_i, I_{i+1}$  – значення інтегралу на  $i$ -му та  $i+1$ -ому кроках інтегрування.

Для знаходження даних формул існує й інший шлях – застосування інтерполяції за Лагранжем чи Ньютоном, але результат буде той самий: відомо, що через задані точки можна побудувати лише один поліном визначеного порядку. Відповідно, результатом будуть формули числових інтеграторів, що знані, як неявні формули Адамса.

Аналогічно, зі збільшенням кількості точок, за якими будується апроксимаційний поліном, можна отримати формули числових інтеграторів вищих, наприклад, четвертого і п'ятого порядків:

$$I_{i+1} = I_i + \frac{h}{24}(9y_{i+1} + 19y_i - 5y_{i-1} + y_{i-2});$$

$$I_{i+1} = I_i + \frac{h}{720}(251y_{i+1} + 646y_i - 264y_{i-1} + 106y_{i-2} - 19y_{i-3}).$$

Підвищення їх порядку призводить до зростання точності та складності виразу для обчислень. У зв'язку з цим доцільно визначити раціональний порядок формули числового інтегрування з метою забезпечення максимального кроку для локальної похибки в межах  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  (в межах т. н. "інженерної" точності).

Для аналізу раціонального порядку числового методу можна використати два підходи:

1) на підставі дослідження частотних характеристик числових інтеграторів, які розглядаються як циф-

рові фільтри – це запропоновано в [3], де за результатами аналізу стверджується, що нема потреби у використанні числових інтеграторів вище третього-четвертого порядків;

2) на підставі результатів числових експериментів; у цьому випадку за перше наближення доцільно взяти рекомендації п. 1, а далі провести їх уточнення.

Очевидно, що другий спосіб дає додаткову інформацію в оцінці раціонального порядку числового методу інтегрування. Як тестову використано вже раніше розв'язану задачу (3), для якої отримані моделюючі рекурентні рівняння на основі формул третього і четвертого порядків. Знайдені вирази для швидкості  $\omega$  та струму якоря  $i_a$  для інтеграторів вищих порядків мають доволі складний вигляд, тому в статті не наводяться через брак місця. Похибки для формул інтегрування другого-четвертого порядків та різних кроків ( $h = 0.01; 0.02$  і  $0.04$  с) показані на рис. 5 (потрібно звернути увагу на масштаб похибок).

Аналіз отриманих графіків показує наявність практично незалежних від порядку числового інтегратора похибок у розв'язку за дії стрибкоподібних збурень (момент накидання навантаження для  $t = 1$  с). Такі похибки пояснюються розривом першого роду функції розв'язку та її похідних. Формули ж числового інтегрування апроксимують рішення обмеженим розкладом у ряд Тейлора, який існує лише для неперервних і диференційованих функцій. Таким чином, наявність розривів у функції розв'язку може бути джерелом досить суттєвих похибок під час моделювання систем з імпульсними елементами.

#### ОЦІНКА ПОХИБОК РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

У застосуванні інтегральних рівнянь для моделювання динамічних систем актуальною є проблема оцінки локальної похибки на кроці розв'язування. Така оцінка дозволяє використати стратегію автоматичного вибору кроку розв'язування для підвищення ефективності процедури розв'язування. З цією метою можливе використання двох підходів:

- 1) застосування екстраполяції за Річардсоном [5], зокрема з одиничним і подвійним (або половинним і одиничним) кроками; недоліком даного способу є відчутне ускладнення процедури обчислень;
- 2) використання для оцінки локальної похибки формули вищого порядку, що є простішим у використанні і може ґрунтуватися на вже виконаних раніше кроках інтегрування (даний підхід є досить поширеним у прикладній математиці, зокрема, в оцінці похибок числових методів інтегрування диференціальних рівнянь [6]).



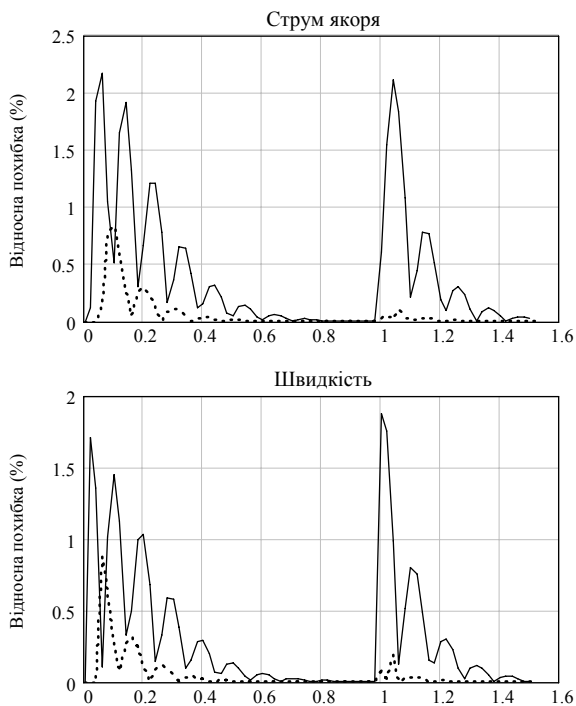


Рис. 7. Графіки відносних похибок у розрахунку динамічних процесів для методу третього порядку і кроку  $h = 0.02$  с:

- точно значення відносної похибки;
- ..... оцінка за допомогою методу інтегрування четвертого порядку.

#### ВИСНОВКИ

Зазначені вище числові експерименти можна було провести на складнішій моделі, але виходячи зі стародавнього принципу "*Не слід ускладнювати сутності понад потребу*", була застосована проста модель ДПС, яка виявилась достатньо інформативною для аналізу та роздумів.

Аналіз отриманих графіків результатів та похибок дає змогу зробити певні висновки:

- 1) за наявності в моделі імпульсних елементів порядок методу інтегрування (з метою забезпечення заданої точності) не має визначального значення, тому раціональним буде використання формули інтегрування другого порядку (неявної формули трапецій) з відповідним кроком; використання методу трапецій має й побічні позитивні ефекти:
  - спрощується реалізація стратегії автоматичного вибору кроку розв'язування;
  - деяке зменшення кроку для збільшення точності розв'язування порівняно з методами вищих порядків дозволяє "акуратніше" відслідковувати зміни функції розв'язку;
  - не вносить фазних похибок в отримані з його допомогою цифрові моделі [3], [4], що є важливим у дослідженнях замкнутих систем автоматичного регулювання;
- 2) у разі гладкого розв'язку для отримання інженерної точності (не вище  $10^{-3} \dots 10^{-4}$ ) раціональним є застосування формул інтегрування другого-третього порядків; застосування формул вищих порядків призводить до значного ускладнення розрахункового виразу – аналогічного ефекту можна досягти незначним зменшенням кроку для згаданих формул;

- 3) відсутнє накопичення похибок числового методу в розв'язку.

Підсумовуючи вище сказане, можна зробити висновки про те, що раціональним варіантом для розв'язування систем інтегральних рівнянь, що описують динаміку сучасних керованих електромеханічних систем, є неявний метод трапецій.

Від автора

*Власне кажучи, про переваги методу трапецій автор й сам давно підозрював, але, як завжди, бракувало доказів...*

Автор з нетерпінням очікує на дискусію щодо поданого матеріалу чи його обговорення як на сторінках журналу, так і в листуванні.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Filc R. Equivalents Method for Linear Circuits Transients Calculation. Proceedings of International Conference on Modern Problems of Telecommunications, Computer Science and Engineering Training. TCSET'2002, Lviv-Slavsko. February, 18-22, 2002, pp. 18-23.
- [2] Верлань А. Ф., Москалюк С. С. Математическое моделирование непрерывных динамических систем. – К.: Наукова думка, 1988. – 288 с.
- [3] Мороз В. Аналіз чисельних методів для аналізу керованих електромеханічних систем// Тези доповідей 3-ої Міжнародної науково-технічної конференції "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці", 25 - 30 жовтня 1999 р., Львів, Україна.
- [4] Мороз В. Аналіз числових методів для моделювання керованих електромеханічних систем// Вісник ДУ "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи", 2000, № 403, с. 111-113.
- [5] Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 608 с.
- [6] Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.

Надійшла 01.09.2006

## ВЛИЯНИЕ АКТИВАЦИИ НА ИЗНОС ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Павленко Т.П., к.т.н, доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. "Электрические машины"

тел. (057) 707-68-44, факс (057) 707-66-01

*У роботі розглянуті питання впливу процесів активації на знос електричних контактів. Враховуючи особливості нового контактного матеріалу, а саме термомісійну активність при виготовленні і експлуатації в реальних умовах, можна сказати, що така контактна композиція може застосовуватися в конструкціях електричних апаратів з дуговою комутацією.*

*В работе рассмотрены вопросы влияния процессов активации на износ электрических контактов. Учитывая особенности нового контактного материала, а именно термомиссионную активность при изготовлении и эксплуатации в реальных условиях, можно сказать, что такая контактная композиция может применяться в конструкциях электрических аппаратов с дуговой коммутацией.*

### ВВЕДЕНИЕ

Учитывая необходимость в низковольтной аппаратуре, перед учеными стоит вопрос постоянного ее обновления. Поиск новых решений дает возможность уменьшения габаритных размеров аппаратов, улучшения параметров и характеристик срабатывания, осуществления подбора новых композиционных материалов для контактных, магнитных, токоведущих, изоляционных и т.п. систем.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что процесс коммутации в электрических аппаратах сопровождается дуговым разрядом в межконтактном промежутке при размыкании контактов. В результате, наблюдается интенсивный износ (эрозия) контактной поверхности. Скорость эрозии поверхности катода находится в тесной связи с температурой катода пятна, плотностью тока, катодного падения потенциала и т.п. [1]. Время неподвижности дуги и скорость последующего ее движения под действием магнитного поля зависят от материалов контакта, причем существенное значение имеет их температура.

Рассмотренные изотермы поверхности контакта (рис. 1.) нагреваемой дугой, перемещающейся со скоростью  $10^2$  см/с показывают, что основной объем расплавленной ванны, имеющей каплевидную форму, располагается позади движущегося теплового источника. Каплевидная форма ванны может привести к совершенно различному механизму разрушения контакта при разных видах дутья. Так при воздушном дутье зона уплотнения находится за движущейся дугой, зона наибольшей турбулентности охватывает максимальный объем расплавленной ванны, что должно приводить к интенсивному разбрызгиванию и выдуванию расплавленного металла. Существуют различные способы уменьшения эрозии рабочей поверхности контактов. В основном это те, которые способствуют уменьшению времени существования дуги на контактной поверхности, например, дугогасительные устройства. Одним из распространенных способов является активирование поверхности [2], которое можно получать распылением или

конденсацией атомных и молекулярных паров, в результате чего на подложке происходит неупорядоченное осаждение. Полученные таким способом активированные поверхности обладают хорошими электрическими, механическими, магнитными свойствами. В момент возникновения дуги между контактами под действием температуры происходит переход зарядов от активного состояния к упорядоченному, что говорит о быстром и скачкообразном изменении перехода основания дуги по рабочей поверхности контакта.

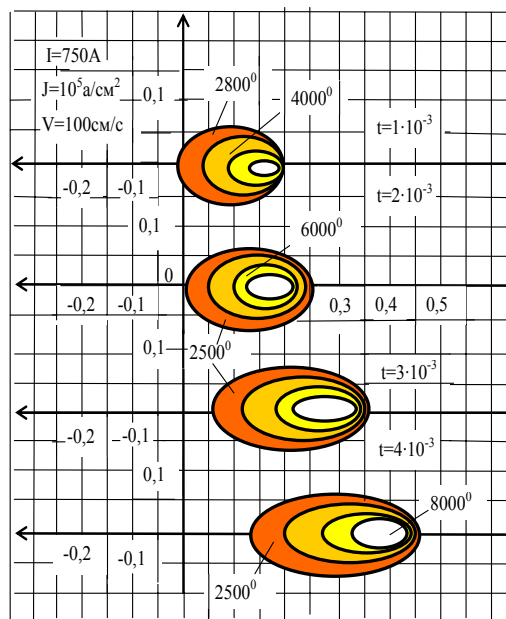


Рис. 1. Изотермы на поверхности контакта

Кроме того, активные добавки имеют высокую способность к химическим реакциям, что может приводить к увеличению поверхности активирования. Химические реакции могут протекать по двум направлениям:

- твердые тела активируются механически, и непосредственно после этого осуществляется реакция с подходящим компонентом;
- участники реакции находятся в системе механической активации (влияние дуги).

Учитывая влияние активации, в данном случае появляются состояния с более сильным возбуждением частиц или реакции со значительно большими энергиями активации. Общий вид активации имеет следующий вид (рис. 2):

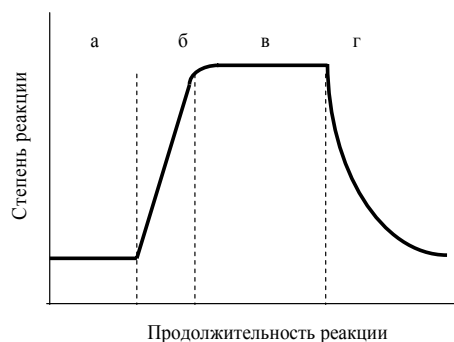


Рис. 2. Схема протекания реакции:

- а) реакция в необратимом состоянии; б) период индукции;
- в) ход реакции во время активации; г) период затухания

Без механического активирования (рис. 2, а) наблюдается или незначительное превращение или оно совсем не происходит. При механической обработке происходит активация и реакция превращения усиливается (рис. 2, б). За этим индукционным периодом следует период стационарного течения реакции, соответствующий данным условиям обработки (рис. 2, в). После прекращения подвода энергии активность поверхности и скорость реакции падает (рис. 2, г).

Анализируя различные способы активирования, и учитывая, что катодное пятно преимущественно привязывается к участкам, имеющим более низкую работу выхода, автор предлагает контактную композицию, имеющую локально-контрастную эмиссионную структуру рабочей поверхности, а именно, чередование участков с большей и меньшей работой выхода. Такая структура достигается активированием материала – основы и при этом контрастность обеспечивается за счет наличия на поверхности зерен с различными кристаллографическими плоскостями. С учетом сказанного, в качестве активатора выбран оксид или гидроксид металла ( $MeO$  и  $Me(OH)_2$ ). Работа выхода  $MeO$  – 0,99 эВ,  $Me(OH)_2$  – 1,5 эВ [1, 2], в качестве материала-основы выбрана композиция на основе серебро-никель (КМК-А30). При активировании никеля работа выхода снижается от 4,5 эВ до 1,52 эВ, серебра – 4,3...1,56 эВ. Существенным различием этих активаторов является их температура плавления:  $1920^{\circ}C$  для  $MeO$ , что существенно выше температуры плавления  $Ni$ ,  $Ag$  ( $1460^{\circ}C$ ,  $960^{\circ}C$ ), и  $760^{\circ}C$   $Me(OH)_2$ , что ниже температуры спекания ( $860^{\circ}C$  ...  $1030^{\circ}C$ ).

Для исследований изготовлен образец контакта методом порошковой металлургии из контактного материала композиции  $AgNi$  с активатором  $Me(OH)_2$ .

Как показали исследования в термоэмиссионном микроскопе, эмиссионная структура активированных материалов неоднородна: зерна серебра (светлые) имеют значительно большую работу выхода, по сравнению с зернами никеля (темные). На их фоне выделяются, превосходя по яркости, частицы активатора и

его скопления по границам зерен. Отсюда можно сделать вывод, что  $Ni$  находится в активированном состоянии по сравнению с  $Ag$  в присутствии данного активатора (рис. 3)



Рис. 3. Микроструктура контактов с примесью активатора (ув.100-500)

Исследования влияния температуры на эмиссионную структуру показали (рис. 4), что при температуре  $600...650^{\circ}C$  (рис. 5, а) начинают светиться частички активатора, что подтверждает их низкую работу выхода при данном фазовом составе материала. До температуры  $700...750^{\circ}C$  (рис. 4, б) наблюдается процесс активирования никеля, что проявляется в последовательном покрытии зерен никеля светлой пленкой. При этом наблюдается разная яркость зерен, что объясняется их разной кристаллографической ориентацией. При температуре  $850^{\circ}C$  (рис. 4, в) происходит дезактивирование никеля при дальнейшем увеличении эмиссии частиц активатора

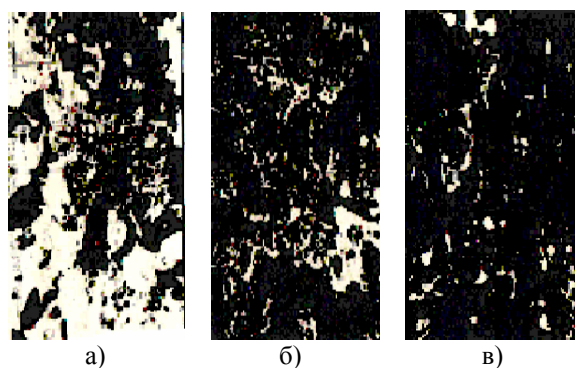


Рис. 4. Термоэмиссионное изображение с примесью активатора (ув. 490)

Это говорит о том, что при неизбежном термическом дезактивировании участков в зоне контактных пятен инициируется их перемещение на участки с более низкой температурой (рис. 5).

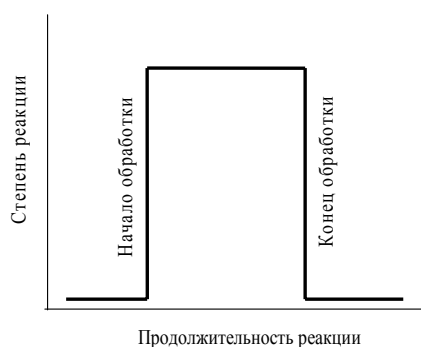


Рис. 5. Схема протекания реакции без периодов индукции и затухания

Таким образом, анализируя рис. 3, рис. 5 можно сказать, что стационарная область у самых разных реакций примерно одинакова, а периоды индукции и затухания протекают различным образом. На рис. 5 степень превращения в период индукции повышается очень круто с началом данной реакции, что говорит о возникновении дуги и высокой скорости превращения (активирования), а в момент прекращения горения дуги или возбуждения частиц, что приводит к резкому снижению температуры - наблюдается крутой спад.

Проведенные эксперименты и результаты, полученные с помощью термоэмиссионного микроскопа, также показали, что контактная поверхность имеет резко выраженный эмиссионный контраст. Деактивация наступает при температуре, что ниже температуры плавления не только никеля, но и серебра. Это дает основание говорить о том, что следует ожидать заметного уменьшения эрозии поверхности контактов.

Как показали предварительные испытания данной композиции в системе с контуром, содержащим магнитное дутье и при токе 3,7-10,5 кА, а также в некоторых электрических аппаратах (табл), эрозия активированной композиции 1,5 -2,5 раза меньше, чем не активированной и имеет резкий контраст по характеру.

Испытания нового контактного материала также проводились в конструкциях электрических аппаратов. А именно в автоматических выключателях (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний автоматических выключателей

Аппарат	Параметры	Режимы испытаний на соответствие ТУ			
		Контактные композиции КМК-А30м/КМК-А10м		СН30* СН30* (активир.)	
		Ком. износ	ПКС, кА О-ВО (износ)	Ком. износ	ПКС, кА О-ВО (износ)
ВА51-35	$I_n=250A$	4000 ц. 40 %	15-18 100%	4000 ц. 20 %	15-18 80%
ВА51-37	$I_n=400A$	2000 ц. 35 %	25 100 %	2000 ц. 25%	25 80-90 %
ВА51-39	$I_n=630A$	2000 ц. 40 %	35 100 %	2000 ц. 30 %	35 85 %
ВА57-31	$I_n=100A$	2000 ц. 35 %	25-60 100 %	2000 ц. 25 %	25-75 85 %

Из проведенных экспериментов также видно, что характер изменения скорости движения дуги в зави-

симости от тока и напряженности магнитного поля соответствует некоторым закономерностям. С увеличением напряженности поля уменьшается значение тока дуги, начиная с которого скорость дуги резко возрастает.

Наличие эмиссионно-активной фазы определенного размера в электродном материале обуславливает развитие на рабочей поверхности псевдодиффузионного дугового разряда. При этом на катоде возникают катодные пятна 1 рода, которые характеризуются высокой подвижностью и малыми размерами.

Интенсивность эрозии снижается в результате уменьшения теплового потока со стороны катодного пятна и, соответственно, меньшего разогрева электрода в зоне привязки дуги.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, данную композицию с определенным содержанием активирующей добавки можно использовать в аппаратах с дуговой коммутацией тока. Полученные результаты исследований открывают новый эффективный путь улучшения параметров электрических аппаратов и экономии дорогостоящей составляющей композиции – серебра. Данная активирующая добавка способствует созданию грубодисперсной композиции, которую можно использовать при одноименном контактировании поверхностей, а также имеется возможность отказа от токсичных компонент, которые используются в электрических контактах для быстрого гашения дуги, например, окиси кадмия.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зыкова Н.М., Канцель В.В., Раховский В.И. Изучение электронных пятен сильноточной электрической дуги при различных давлениях в инертных газах в вакууме. – В кн. Сильноточные электрические контакты. Киев, Наукова думка, 1970. – 110 с.
- [2] Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. - Киев: "Наукова думка", 1981.- 338 с.
- [3] Физико-химические свойства окислов. Справочник. / Под ред. Самсонова Г.В.- М.: Металлургия, 1978.- 472 с.
- [4] Дугостійкий електричний контакт. Патент 6960 від 30.03.95. Кригіна Т.П., Павленко Ю.П. та інші.

Поступила 14.09.2006

## НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ

Поляков М.А., к.т.н., доц.

Запорожский национальный технический университет

Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, ЗНТУ, кафедра "Электрические аппараты"

тел (061) 289-16-10, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua

*Розглядається структура та принципи побудови нечіткого регулятора охолодження потужного трансформатору, у якому з метою зменшення термічного зносу ізоляції трансформатору використовується лінгвістичні змінні прогнозу зміни струму навантаження та температури навколишнього середовища.*

*Рассматриваются структура и принципы построения нечеткого регулятора охлаждения силового трансформатора, в котором с целью уменьшения термического износа изоляции трансформатора используются лингвистические переменные прогноза изменения тока нагрузки и температуры окружающей среды.*

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], принудительное охлаждение существенно снижает термический износ изоляции силового масляного трансформатора. Вместе с тем, работа самой системы охлаждения связана со значительными эксплуатационными расходами и задача регулятора охлаждения, с одной стороны, не допустить ускоренного термического износа изоляции трансформатора в результате ее перегрева, а с другой – минимизировать эксплуатационные расходы на систему охлаждения, которые, в первом приближении, пропорциональны времени ее работы. В известных системах используются релейные регуляторы с обратной связью по выходной переменной объекта управления - текущей температуре обмотки трансформатора или верхних слоев масла. Возмущающими факторами в регуляторе являются ток нагрузки и температура окружающей среды. Недостаточная эффективность регулятора с такой структурой вызвана характером изменения возмущающих воздействий в системе регулирования охлаждения трансформатора, сложностью физических процессов, определяющих температуру элементов его конструкции, в первую очередь температуру изоляции трансформатора. Так, скачкообразный рост тока нагрузки приводит к быстрому повышению температуры обмотки и изоляции трансформатора, а температура масла после включения системы охлаждения уменьшается значительно медленнее, поскольку тепловая постоянная времени масла на два порядка больше тепловых постоянных обмотки и изоляции трансформатора.

В последнее время силовые трансформаторы оснащаются системами непрерывного контроля технического состояния (СНКТС), в состав которых входят промышленные контроллеры и компьютеры, имеющие выход в Интернет [2]. Это позволяет расширить информационную базу для управления охлаждением, в частности использовать базу данных СНКТС для прогнозирования изменений возмущающих факторов и построения регулятора с упреждающим управлением по возмущению (feed forward from process disturbances). Как правило, прогноз носит качественный характер и, поэтому, перспективно применение для управления охлаждением принципов нечеткого управления [3].

### СТРУКТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ

С точки зрения теории автоматического управления, структура регулирования охлаждения силового масляного трансформатора определяется целями регулирования, заданием на регулирование, переменными процесса управления, возмущающими воздействиями, режимами охлаждения, управляющими переменными и типом регулятора. Возможные варианты структур регулирования приведены в табл. 1.

В таблице использованы следующие условные обозначения:  $\Theta_o$ ,  $\Theta_{om}$  – текущая, максимально допустимая температура масла;  $\Theta_i$ ,  $\Theta_{im}^n$  – текущая, максимально допустимая и прогнозируемая температура обмотки;  $I$ ,  $\Delta I^n$  – текущее значение, прогноз изменения тока нагрузки;  $\Theta_a$ ,  $\Delta \Theta_a^n$  – текущее значение, прогноз изменения температуры окружающей среды;  $V$ ,

Таблица 1

Структуры регулирования охлаждения силового масляного трансформатора

Вариант структуры	Цель регулирования	Задание на регулирование	Переменные процесса управления	Возмущающие воздействия	Управляющие переменные	Тип регулятора
1	Ограничение $\Theta_{im}$	$\Theta_{om}$	$\Theta_o$ ,		$N, \Delta N$	Релейный
2	Ограничение $\Theta_{im}$	$\Theta_{om}$ , $\Theta_{im}$	$\Theta_o$ , $\Theta_i$	$I$ , $\Theta_a$	$N, \Delta N, M$	Релейный, нечеткий
3	Ограничение $\Theta_{im}^n$	$\Theta_{om}$ , $\Theta_{im}$	$\Theta_o$ , $\Theta_i$	$I$ , $\Theta_a$ , $\Delta I^n$ , $\Delta \Theta_a^n$	$N, \Delta N, M$	Нечеткий
4	Ограничение $V$	$V_m$	$V$	$I$ , $\Theta_a$	$N, \Delta N, M$	Нечеткий
5	Ограничение $V^n$	$V_m$	$V$	$I$ , $\Theta_a$ , $\Delta I^n$ , $\Delta \Theta_a^n$	$N, \Delta N, M$	Нечеткий

$V_m, V^n$  – текущая, максимально допустимая и прогнозируемая относительная скорость термического износа изоляции;  $N$  – количество ступеней охлаждения, включенных в текущий момент;  $\Delta N$  – приращение количества включенных ступеней охлаждения в результате регулирования;  $M$  – управление включением вентиляторов ступеней охлаждения. Некоторые переменные структур регулирования могут быть заданы в относительной форме:  $K$  – коэффициент нагрузки (отношение тока  $I$  к номинальному току);  $\Delta K^n$  – прогноз изменения коэффициента  $K$  относительного его текущего значения;  $\Delta \Theta_i$  – запас по температуре обмотки ( $\Theta_{im} - \Theta_i$ ) и т. п. Это позволяет повысить универсальность соответствующего регулятора.

Структура 1 является наиболее простой в реализации. Она использует только одну измеряемую величину ( $\Theta_o$ ), не требует выполнения вычислительных операций и может быть реализована аппаратно. В структуре 2, за счет непосредственного измерения  $\Theta_{im}$  и учета текущих значений возмущающих воздействий ( $I, \Theta_a$ ), более полно реализуется цель регулирования и возможно разделение режимов охлаждения OFAN и OFAF. Переход к структуре 3 позволяет уменьшить усредненную в интервале прогноза температуру  $\Theta_{im}^n$  за счет опережающего включения и выключения ступеней системы охлаждения. Проиллюстрируем идею опережающего управления по возмущению на примере прогноза тока нагрузки  $I$ . Данные [4], полученные СНКТС в период эксплуатации, свидетельствуют о наличии существенных колебаний нагрузки тока нагрузки в течение суток, которые вызваны интенсивной работой общественного транспорта в "часы пик", режимом работы промышленных предприятий, расходами электроэнергии на освещение, бытовые нужды и другими факторами. Действие этих факторов повторяется с периодом суток и недели, что позволяет предсказать характер изменения тока нагрузки  $I$ . Если к текущему моменту времени  $t_1$  система охлаждения имеет прогноз резкого увеличения тока  $I$  в интервале времени  $[t_2, t_3], t_3 > t_2 > t_1$ , то это дает возможность уменьшить температуру масла  $\Theta_o$  к моменту времени  $t_2$  путем включения охлаждения в момент  $t_1 \leq t_j < t_2$ . В результате чего уменьшится износ изоляции в интервале времени  $[t_1, t_3]$  и, возможно при  $t > t_3$ . Источником прогноза могут служить статистические данные, накопленные СНКТС в предыдущие периоды эксплуатации трансформатора или поступающие извне, например метеорологический прогноз изменения температуры воздуха. Основными параметрами прогноза, существенными для управления охлаждением, являются: временной интервал прогноза, значение и погрешность определения прогнозируемой величины в интервале прогноза. Временной интервал прогноза выбирается равным двум - трем тепловым постоянным времени системы охлаждения.

Структура 4 дополнена блоком расчета скорости  $V$ , интегрируя которую по времени можно непрерывно определять относительное сокращение срока службы изоляции в результате термического износа и оценивать остаточный ресурс изоляции трансформатора. Скорость  $V$  определим по формуле [1]:

$$V = 2^{(\Theta_i - \Theta_{i1})/6}, \quad (1)$$

где  $\Theta_{i1}$  – температура наиболее нагретой точки изоляции трансформатора, при которой относительная скорость термического износа изоляции равна единице (для бумажной изоляции температура  $\Theta_{i1}$  принимается равной 98°C).

Учет в структуре 5 значений прогнозов изменения возмущающих факторов также позволяет уменьшить скорость  $V^n$ .

#### СТРУКТУРА НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Как уже отмечалось, реализация структур регулирования охлаждения, приведенных в табл. 1, возможна с применением регулятора нечеткого типа. Структура нечеткого регулятора описывается лингвистическими переменными, базой правил нечетких продукций и алгоритмом нечеткого вывода [3]. Каждая лингвистическая переменная определена как кортеж  $\langle \beta_j, T_j, X_j \rangle$ , где  $\beta_j$  – название;  $T_j$  – базовое термножество;  $X_j$  – область определения нечетких переменных  $j$ -ой лингвистической переменной. Термножество  $T_j$  задается перечислением лингвистических термов с описанием их функций принадлежности. Для ограничения объема базы правил нечетких продукций, в предлагаемом автором регуляторе мощность термножества принята равной трем элементам – NB (отрицательное большое), Z (близкое к нулю), PB (положительное большое). В качестве функций принадлежности выбраны: для NB - zmf ( $Z$  - образная); для  $Z$  - trapmf (трапецевидная) или pimf ( $I$ -образная); для PB - smf ( $S$ -образная). Перечисленные функции принадлежности являются кусочно-линейными и задаются относительно небольшим числом точек. Границы областей  $X_j$  определены техническими характеристиками трансформатора и рекомендациями руководства по нагрузке [1]. База правил нечетких продукций содержит, в зависимости от требований к качеству регулирования, количества входных и выходных лингвистических переменных, содержит от 10 до 30 правил типа «ЕСЛИ "множество подусловий, соединенных операцией нечеткой конъюнкции или дизъюнкции" ТО "заклучение"». Подусловия и заключения в правилах представляют собой нечеткие высказывания относительно используемых лингвистических переменных. В предлагаемых регуляторах использован широко распространенный алгоритм нечеткого вывода Мамдани.

Поскольку описываемые регуляторы предполагается реализовывать в промышленных контроллерах, то специфицирование регуляторов выполнено на языке FCL (Fuzzy Control Language) в соответствии со стандартом IEC 61131-7. В качестве примера, приведем функции принадлежности термов (рис. 1) и фрагмент специфицирования на языке FCL (рис. 2) лингвистической переменной "прогноз изменения коэффициента нагрузки".



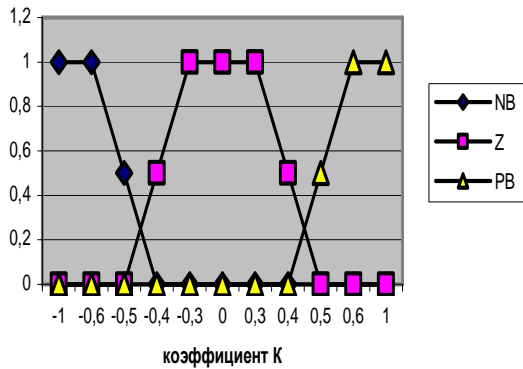


Рис. 1. Функции принадлежности термов NB, Z, PB лингвистической переменной "прогноз изменения коэффициента нагрузки"

```

FUNCTION_BLOK регулятор
VAR_INPUT
прогноз изменения коэффициента нагрузки: REAL;
END_VAR
FUZZIFY прогноз изменения коэффициента нагрузки
TERM NB := (-0,6, 1) (-0,4, 0)
TERM Z := (-0,5, 0) (-0,3, 1) (0,3, 1) (0,5, 0)
TERM PB := (0,4, 0) (0,6, 1)
END_FUZZIFY
END_FUNCTION_BLOK

```

Рис. 2. Фрагмент спецификации лингвистической переменной "прогноз изменения коэффициента нагрузки" на языке FCL

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Описанные выше структуры регуляторов моделировались в среде пакета программ MATLAB. Модель системы охлаждения, кроме собственно регулятора, содержит блоки генерации возмущающих воздействий и их прогнозов, термодинамическую модель трансформатора и блок оценки качества регулирования.

Для настройки регулятора параметры зависимостей от времени возмущающих воздействий стандартной формы выбраны в соответствии с [1]. Температура окружающей среды изменяется по синусоидальному закону с периодом равным суткам, а ток нагрузки рассматривается как ступенчатая функция, состоящая из одной ступени направленной вверх, и через некоторое время одной ступени, направленной вниз.

Блок генератора прогнозов формирует значение  $\Delta I^n$ ,  $\Delta \Theta a^n$  возмущающих воздействий  $I$ ,  $\Theta a$  на срок прогноза относительно текущих значений этих воздействий. Прогноз моделируется на основе модели смещенного во времени на срок прогноза текущего значения возмущающего воздействия. При этом прогнозируемое значение возмущающих воздействий усредняется в окрестности точки времени прогноза.

Нечеткий регулятор представляет собой блок fuzzy logic controller, конфигурированный в пакете Fuzzy Logic входящем в MATLAB.

Термодинамическая модель трансформатора формирует значение температуры верхних слоев масла, как результат процессов нагрева и охлаждения, которые описываются уравнением теплового баланса.

Параметры модели зависят от режима охлаждения.

Блок оценки качества регулирования формирует два критерия: технический - расход  $L$  ресурса изоляции трансформатора в результате термического износа и экономический - экономическая эффективность регулирования охлаждения. Расход  $L$  определяется путем интегрирования скорости  $V$  по времени в интервале моделирования. При этом, скорость  $V$  рассчитывается по формуле (1), если температура  $\Theta_i$  находится в пределах ( $80 \leq \Theta_i \leq 140^\circ\text{C}$  по [1]), в которых уменьшение  $V$  в интервалы времени когда коэффициент  $K < 1$  компенсируется увеличением  $V$  в интервалы времени когда коэффициент  $K > 1$ . При  $\Theta_i < 80^\circ\text{C}$  принимается  $V = 0,125$ , а при  $\Theta_i > 140^\circ\text{C}$  -  $V = 128$ . Экономическая эффективность регулирования охлаждения определена как разность между ценой сэкономленного ресурса изоляции и затратами на систему охлаждения. При этом такие эксплуатационные расходы на систему охлаждения как расход электроэнергии, расход ресурса электродвигателей, вентиляторов и насосов приняты пропорциональными времени, когда охлаждение включено, а для коммутационных элементов - пропорциональными количеству включений.

Моделирование процессов охлаждения проводилось на временном интервале равном суткам для трансформатора (АТДЦН 100000/220/150) с одной ступенью системы охлаждения, работающей в режимах ONAN и OFAF. Параметры модели системы охлаждения выбраны таким образом, чтобы моделируемые тепловые процессы соответствовали результатам тепловых испытаний реального трансформатора, а средняя относительная скорость износа изоляции равнялась единице при нагреве изоляции током нагрузки с параметрами, рекомендованными для режима систематических нагрузок по [1] и регулировании охлаждения с помощью релейного регулятора. В результате моделирования системы охлаждения с нечетким регулятором при тех же токах нагрузки расход ресурса изоляции снизился на 7-9%.

Пример результатов моделирования процессов охлаждения трансформатора с одной ступенью охлаждения в режимах ONAN и OFAF приведен на рис. 3.

На рис. 3 изображены сверху вниз графики температуры верхних слоев масла, тока нагрузки, прогноза изменения тока нагрузки, температуры окружающей среды, прогноза изменения этой температуры, режима охлаждения ("1" соответствует режиму OFAF, а "0" - ONAN) и расхода ресурса изоляции.

Один из вариантов предложенных структур регулирования реализован [5] в виде части программного обеспечения промышленного контроллера SLC (компания Rockwell Automation, США), которые применяются в учебно-научной лаборатории АСУ ТП Запорожского национального технического университета. Программирование алгоритма регулирования выполнено на языке программирования LD по стандарту IEC 61131-3 в среде пакета RSLogix программирования контроллеров. Программа регулятора протестирована путем сравнения с результатами моделирования идентичной системы в среде пакета Fuzzy Logic. Максимальное время программного скана программы в контроллере SLC500 составило около трех

секунд, что приемлемо при регулировании тепловых процессов с большими постоянными времени. Для уменьшения времени загрузки процессора контроллера задачей нечеткого регулирования предполагается в дальнейшем выполнять ее в среде приложений SCADA – системы или MATLAB исполняемых на промышленном компьютере СНКТС, используя функции DDE для обмена данными между этими приложениями и контроллером.

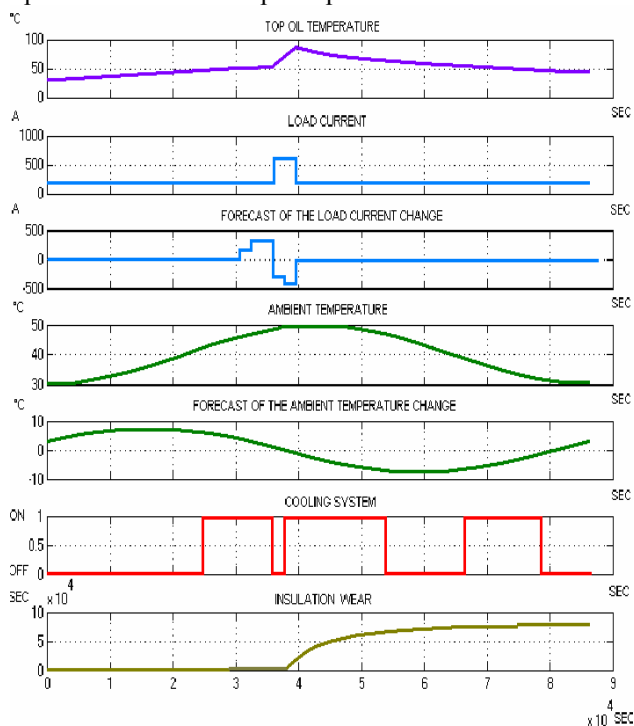


Рис. 3. Пример моделирования процессов охлаждения трансформатора

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение в структуру регулирования охлаждения лингвистических переменных прогнозов изменения коэффициента нагрузки трансформатора и температуры окружающей среды позволило повысить качество регулирования и снизить на этой основе термический износ изоляции силового масляного трансформатора.

Предполагается использование предложенных нечетких регуляторов в СНКТС трансформаторов производства ОАО "Запорожтрансформатор".

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.
- [2] Pink T, Stewart P. Power Transformer Control System Developments providing improved reliability and increased overload capacity // Proceeding of TechCon@2004 North America (San Antonio, Texas, January 28,29, 2004), pp 73-88.
- [3] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTech. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003, - 736 с /Мастер решений/.
- [4] Рассальский А.Н. Доклад "Диагностика трансформаторного оборудования на подстанциях 220-750 кВ посредством непрерывного контроля основных параметров в режиме эксплуатации" // Второй международный научно-технический семинар "Современные методы оценки технического состояния и способы повышения надежности оборудования подстанций", (г. Москва, 25-29 октября 2004 г.). Исполнительный комитет Электроэнергетического Совета СНГ совместно с ОАО РАО "ЕЭС России", ОАО "ФСК ЕЭС".
- [5] Поляков М.А. Нечеткое регулирование охлаждения силового масляного трансформатора. – Сб. трудов конф. "Автоматизация: проблемы, идеи, решения" (Севастополь, 12-15 сентября 2006), СевНТУ, 2006.

Поступила 18.09.2006

## ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З МАСИВНИМ ФЕРОМАГНІТНИМ РОТОРОМ ПРИ ПІДВИЩЕНІЙ ЧАСТОТІ ЖИВЛЕННЯ

Попович О.М., к.т.н., Головань І.В.  
 Інститут електродинаміки НАН України  
 Україна, 03680, Київ, пр-кт Перемоги, 56  
 тел. (044) 454-26-37

*Запропонована уточнена математична модель з урахуванням еквівалентних контурів втрат в сталі статора і ротора від вихрових струмів для формування пускових характеристик асинхронних двигунів з частотозалежними параметрами ротора.*

*Предложена математическая модель с учетом эквивалентных контуров потерь в стали статора и ротора от вихровых токов для формирования пусковых характеристик асинхронных двигателей с частотозависимыми параметрами ротора.*

Асинхронні двигуни (АД) з гладким масивним феромагнітним ротором (МФР) є найбільш простими серед АД з масивними елементами магнітопроводу (МЕМ) ротора. Дані ротори мають частотозалежні параметри і забезпечують високу добротність пуску. Вони можуть ефективно використовуватись в умовах частих та важких пусків, при параметричному регулюванні швидкості. Частотозалежність параметрів забезпечується завдяки нелінійності процесів, що пов'язані із наявністю вихрових струмів в МЕМ: із витісненням потоку на периферію магнітопроводу та змінною величиною втрат в ньому. Конструкція АД з гладким масивним феромагнітним ротором (МФР), внаслідок притаманних їй вад, має обмежене використання при 50 Гц. При зміні умов роботи, завдяки значній нелінійності параметрів АД з МФР, її техніко-економічні показники можуть суттєво змінюватись. Пошук оптимального варіанту електроприводу для конкретного навантажувального механізму потребує врахування всіх альтернативних варіантів, і АД з МФР зокрема.

Розрахунок характеристик АД з МФР ускладнюється специфікою процесів в ньому. Найбільш точно таку задачу можна розв'язати методом кінцевих елементів (МКЕ) в тривимірній постановці. Але це потребує значних ресурсів обчислювальної техніки [6] і в практиці проектування АД може використовуватись лише для тестування більш простих моделей. Ефективність методів проектування можна суттєво покращити, якщо використовувати точні польові підходи для визначення залежностей зміни інтегральних параметрів АМ, і застосовувати їх при розрахунках режимів роботи.

Розрахунок режиму роботи АД з МФР в даній роботі виконано при застосуванні математичної моделі, де процеси в масивному магнітопроводі з розподіленими вихровими струмами еквівалентуються процесами в еквівалентних контурах вихрових струмів з зосередженими параметрами [5]. Застосовано дві багатофазні системи еквівалентних контурів. Для визначення їх розміщення в просторі та їх параметрів, циліндр МФР розподілено на  $z_r$  секторів. Вихорові струми кожного сектора еквівалентуються струмами двох взаємоперпендикулярних короткозамкнених витків. Зміна струму в цих контурах моделює зміну в

просторі МРС вихрових струмів в елементах масивного ротору. В розглядаємому випадку МФР, рівняння електричної та механічної рівноваги подібні до [5] при представленні зубцевих та ярмових роторних контурів контурами по радіальному і по тангенціальному напрямкам відповідно.

Для розв'язання рівнянь електричної рівноваги визначено параметри роторних контурів і виконано розрахунок магнітного кола для потоку взаємної індуктивності статор-ротор. Зосереджені струми роторних контурів еквівалентують розподілені вихорові струми в масиві ротора. Умовами еквівалентування є рівність втрат активної енергії та енергії магнітного поля при однаковій величині магнітного потоку взаємної індуктивності статор-ротор та частоті.

В відповідності до розподілу магнітного поля, що визначено в тривимірній постановці [6], розглянуто два основні шляхи проходження магнітного потоку взаємної індуктивності статор-ротор: по боковій поверхні циліндру ротора та по торцевій поверхні ротора.

Врахування нелінійних властивостей параметрів АД з МФР здійснено за рахунок визначення їх функціональної залежності, при кожному значенні ковзання, від незалежних змінних. Параметри по основному полю є функціями коефіцієнту насичення магнітного поля, що залежить від сумарної МРС машини [5]. Параметри статора можуть визначатись за допомогою відомих методик, наприклад [1]. Активний опір та індуктивність розсіювання роторного контуру, при фіксованому ковзанні, залежить від величини струмів.

Визначення параметрів контурів ротора здійснено в припущенні, що параметри поля змінюються в часі по синусоїдному закону. При цьому енергія в еквівалентний контур потрапляє при взаємодії з основним потоком взаємної індуктивності в відповідності до рівняння електричної рівноваги:

$$0 = r\dot{I} + j\omega\dot{L} + j\omega M\dot{I}_\mu, \quad (1)$$

яке, помножене на сполучений струм  $I^*$ , дає можливість записати, виходячи з співвідношення для трикутника комплексної потужності:

$$P^2 + Q_\sigma^2 = e^2 I^2; \quad I = \frac{\sqrt{P^2 + Q_\sigma^2}}{e}; \quad (2)$$

$$r = \frac{P}{I^2}; \quad l = \frac{Q_\sigma}{\omega I^2},$$

де  $P$  – втрати активної потужності в елементах магнітопроводу, що еквівалентується контуром;  $Q_\sigma$  – реактивна потужність еквівалентного контуру, що обумовлена зміною запасу енергії магнітного поля розсіювання;  $I, I_\mu$  – діючі струми контуру та намагнічування;  $e = \omega M I_\mu = \omega \Phi / \sqrt{2}$  – діюче значення ЕРС, яка виникає в контурі при зміні потоку взаємної індуктивності, що зчіплюється з ним ( $\Phi$ ), з кутовою частотою  $\omega$ ;  $r$  – активний опір;  $M$  – індуктивність, що обумовлена основним потоком статор-ротор;  $l$  – індуктивність розсіювання.

Розрахунок параметрів магнітного кола, при наявності двох шляхів потоку взаємної індуктивності, здійснено при умові їх паралельного з'єднання.

Параметри магнітного поля ротора по потоку бокової поверхні визначаються за допомогою двовимірної розрахункової моделі в площині, що перпендикулярна осі АД. Параметри магнітного поля ротора по потоку торцевих поверхонь також визначаються за допомогою подібної моделі, але при відсутності вихрових струмів і врахуванні витіснення потоку з ротора до торцевих поверхонь за допомогою еквівалентної магнітної проникності, що розраховувалась за результатами розв'язання одномірної польової задачі проникнення плоскої електромагнітної хвилі в проводячий феромагнітний напівпростір [7].

Реактивна енергія розсіювання в секторі ротора, в припущенні нехтування лобовими ефектами, визначається наступним чином:

$$Q_\sigma = (Q - Q_m) / z_r, \quad (3)$$

де  $Q$  – реактивна енергія в досліджуємі області (повітряний проміжок та ротор, статор не враховується внаслідок прийнятої умови набагато більшої величини магнітної проникності його матеріалу);  $Q_m = e I_\mu$  – реактивна енергія по потоку взаємної індуктивності, що визначається як добуток діючих значень ЕРС та струму намагнічування ( $I_\mu = 2F / \sqrt{2}$ ).

Врахування краєвих ефектів при протіканні вихрових струмів бокової поверхні ротора по краєвій (лобовій) зоні здійснено при розрахунках двовимірної польової задачі в площині, що співпадає з віссю машини. Картина струмів лобових частин розглядається в момент їх максимуму.

Визначення параметрів еквівалентних контурів при розв'язанні польової задачі в квазітривимірній постановці потребує узгодження залежностей параметрів. Для випадку розрахунків параметрів поля, в припущенні довгого ротора, рівняння електричної рівноваги еквівалентного контуру (1), з урахуванням,

що  $rI = P / I$ ;  $\omega l I = Q_\sigma / I$ , можна представити:

$$\left| \omega \Phi / \sqrt{2} \right| = \left| P / I + j Q_\sigma / I \right|. \quad (4)$$

Врахування процесів в лобових зонах веде до виникнення, при даних струмах, додаткового споживання потужності. Згідно з (38), збільшення втрат на  $P_\sigma, Q_\sigma$  може мати місце при збільшенні потоку на деяку величину  $\Phi_\sigma$ :

$$\left| \omega \Phi_\sigma / \sqrt{2} \right| = \left| P_\sigma^* / I + j Q_\sigma^* / I \right|. \quad (5)$$

Таким чином, в квазітривимірній постановці задачі, потужності, що визначено вище, будуть мати місце не при потоці  $\Phi$ , а при більшому –  $\Phi'$ . При його визначенні треба підсумовування проводити з урахуванням комплексності доданків:

$$\Phi' = \Phi \sqrt{\frac{(P + P_\sigma)^2 + (Q_\sigma + Q_\sigma)^2}{P^2 + Q_\sigma^2}}, \quad (6)$$

Даний вираз, з урахуванням залежностей зміни втрат потужності та зв'язку  $F = f(\Phi')$ , що отримано при розрахунках магнітного кола, дає можливість отримати залежності зміни параметрів еквівалентних контурів ротора в функції МРС.

Розроблену математичну модель по визначенню параметрів МФР реалізовано з використанням програм-оболонок по дослідженню електромагнітного поля методом кінцевих елементів. Масиви залежностей параметрів в функції МРС машини використано при розрахунках режимів роботи в системі MATLAB – SIMULINK.

Для тестування розробленої математичної моделі виконано порівняння із даними фізичного експерименту [4] по дослідженню характеристик АД з гладким МФР на базі АО2-81-2. Для порівняння результати зведено в табл. 1. Розбіжності, що мають місце, значною мірою обумовлено неврахуванням в процесі чисельного експерименту додаткових втрат. З урахуванням їх впливу здійснено корекцію розрахункових даних за допомогою інформації про суму основних і додаткових втрат в роторі, що отримано із фізичного експерименту [4]. Віднявши від даної суми розрахункове значення втрат в роторі, отримано залежність зміни додаткових втрат в робочій зоні. Приймав, що додаткові втрати змінюються в функції струму в ступені 1.7...2 [1], їх апроксимовано поліномом  $P_{\text{дод}} = -1.656I^{1.7} + 9.38I^{2.0}$ . Із використанням даного поліному виконано корегування розрахункових даних (табл. 1).

Таблиця 1

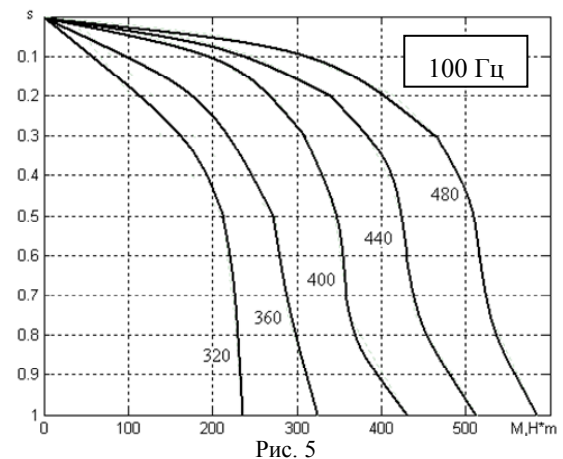
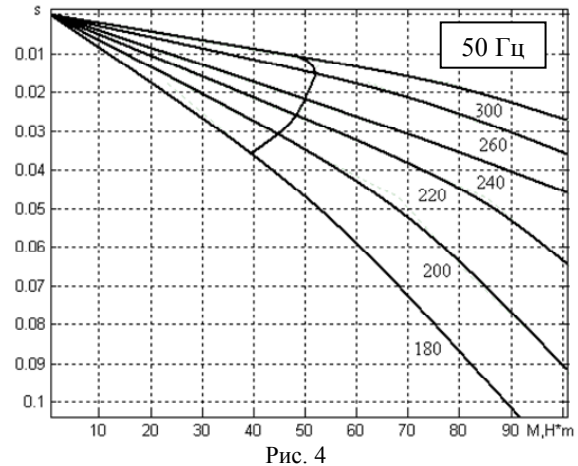
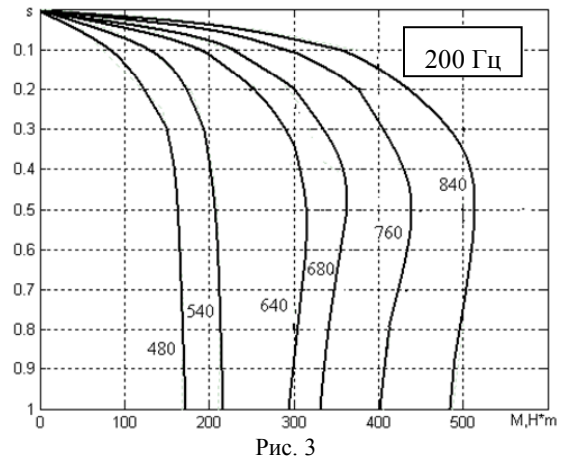
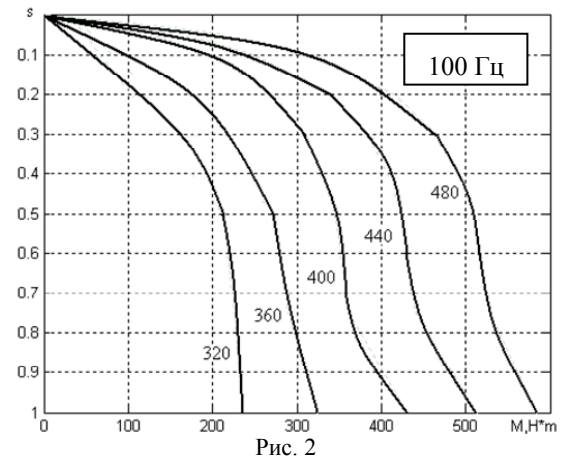
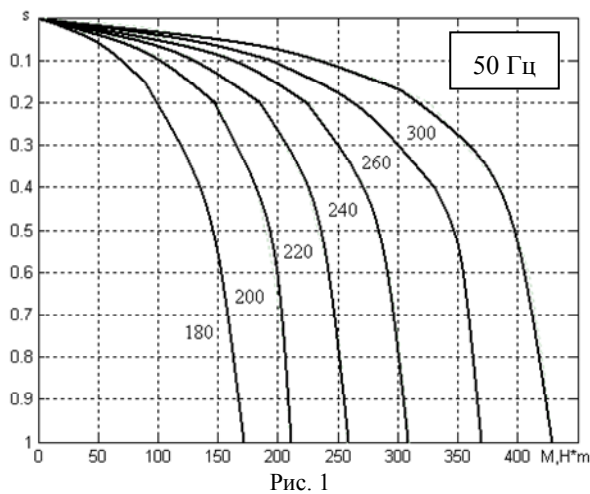
s, %	Фізичний експеримент				Розрахунок без врах. дод. втрат (з врах. дод. втрат)			
	I, А	cosφ, д.о	η, д.о	M <sub>ем</sub> , Н·м	I, А	cosφ, д.о	η, д.о	M <sub>ем</sub> , Н·м
1.55	32	0.62	0.64	27	30 (32)	0.57 (0.62)	0.67	34 (29.5)
3.53	51	0.67	0.73	51	50 (53)	0.64 (0.68)	0.714	66 (55)
6.6	70	0.69	0.69	73	77 (82)	0.66 (0.71)	0.65	100 (82)
9.0	100	0.71	0.66	103	96 (103)	0.66 (0.71)	0.63	127 (103)
100	270	-	-	270	275	0.58	-	258

При цьому додаткові втрати враховано відповідним опором, що підключено паралельно АД до джерела живлення. Це дозволило скорегувати величини струму та коефіцієнту потужності [2]. Розрахункову корисну потужність отримано відніманням від добутку електромагнітного моменту та частоти обертання ротора величини механічних та додаткових втрат (табл. 2).

Таблиця 2

$f_c$ , Гц	50	100	200
$U$ , В	260	400	540
$M_{дпн}$ , Н·м	51	45	28
$s$ , д.о	0.013	0.013	0.011
$P_2 = M_{дпн} \cdot \omega_r - P_{доб}$ , кВт	16-2= =14	27.8-1.8= =26	34.8-1.7= =33.1
$\eta$ , д.о	0.62	0.86	0.91
$\cos \phi$ , д.о.	0.60	0.65	0.68
$I_n$ , д.о	4.4	5.4	3.0
$M_n$ , д.о	2.8	3.3	1.6
Добр. пуску, Н·м/А	1.1	1.05	0.92

**Чисельний експеримент** по дослідженню характеристик АД з МФР на базі АД АО2-81-2 виконано при варіюванні частотою та напругою живлення. При цьому отримано робочі, механічні (рис. 1, 2, 3) характеристики. Досліджено величину допустимого за нагрівом моменту ( $M_{дпн}$ ) в припущенні сталого зовнішнього обдуву. Для цього фіксувалась точка на механічній характеристиці, в якій гріючі втрати дорівнювали таким для базового АД в номінальному режимі. Криву зміни допустимого за нагрівом моменту нанесено на фрагменти механічних характеристик (рис. 4, 5, 6), де цифрами позначено величину фазної напруги. Дані по робочому та пусковому режимам, при різних частотах, для напруги, що забезпечує максимум  $M_{дпн}$ , зведено в табл. 2. Дані пускового режиму є відносними до номінальних базового АД. Добротність пуску визначено відношенням пускових моменту та струму.



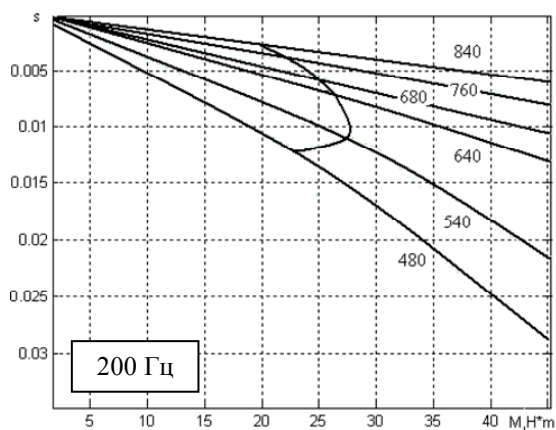


Рис. 6

### ВИСНОВОК

1. Розроблена математична модель та алгоритм розрахунку характеристик АД з МФР в квазітривимірній постановці задачі дослідження електромагнітного поля машини забезпечують:

- достатню для інженерних розрахунків точність (розбіжності між результатами фізичного та математичного експерименту з корегованими по додатковим втратам знаходиться в межах 5%);
- ефективне використання часових ресурсів обчислювальної техніки;
- можливість дослідження режимів роботи в широкій межі варіювання напругою та частотою живлення, завдяки базуванню на результати моделювання електромагнітного поля без використання емпіричних залежностей.

2. Дослідження величини допустимого за перегрівом моменту АД з МФР при варіюванні напругою та частотою живлення показало:

- можливість визначення потрібного, за заданими критеріями, закону зміни відношення  $U/f$ ;
- зменшення відношення  $U/f$ , збільшення жорсткості механічних характеристик, збільшення енергетичних показників, незначну зміну добротності пуску при збільшенні частоти живлення.

3. Практичне використання АД з МФР при  $f=50$  Гц обмежено величиною додаткових втрат, малою жорсткістю механічної характеристики і низькими енергетичними показниками. Коефіцієнт використання габаритної потужності складає 35%.

4. При збільшенні частоти живлення розрахункова енергоефективність АД з МФР (при застосованому алгоритмі визначення додаткових втрат) суттєво підвищується. Так, при  $f=200$  Гц енергетичні показники і допустима потужність співрозмірні з показниками базового серійного двигуна. Завдяки даним властивостям, можливо практичне використання АД з МФР для приводу механізмів, що потребують збільшення частоти обертання при сталій потужності і в випадку обмеженості застосування шихтованого ротора при більших обертах внаслідок механічних обмежень (наприклад, в АД приводу занурених насосів).

5. Перспективи практичного використання АД з МФР на підвищену частоту живлення обумовлюють потребу ретельних досліджень в напрямку зменшення

додаткових втрат і застосування АД із різновидами МФР.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Бойко Е.П., Гаинцев Ю.М. Асинхронные двигатели общего назначения. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
- [2] Куцевалов В.М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами. - М.: Энергия, 1979. - 160 с.
- [3] Могильников В.С., Олейников А.М., Стрельников А.Н. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение. – М.: Энергоатомиздат. 1983.-120 с.
- [4] Лищенко А.И., Лесник В.А. Экспериментальное исследование рабочих и пусковых характеристик асинхронных двигателей с массивным ферромагнитным ротором. Препринт-436 ИЭД АН УССР, Киев, 1995. 31 с.
- [5] Попович О.М., Головань І.В. Математична модель для розрахунку пускових характеристик асинхронного двигуна з урахуванням еквівалентних контурів втрат в сталі статора і ротора. // Міжнародний симпозиум "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів". Електротехніка і електромеханіка. 2006, №1, С. 42-46.
- [6] Попович О.М., Головань І.В. Алгоритм розрахунку параметрів магнітного поля асинхронних двигунів з масивними ферромагнітними елементами в роторі. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. 2006, ч.3, С. 55-58.
- [7] Попович О.М., Головань І.В. Врахування джерела живлення при визначенні втрат в сталі асинхронних двигунів. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КПДУ. - Кременчук: КПДУ, 2005.- Вип.4 / 2005(33) - С. 150-152.

Надійшла 18.09.2006

## РЕГУЛЯТОР ПОТОКА МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Розанов Ю.К., д.т.н., проф., Крюков К.В.,  
Московский энергетический институт (Технический университет)  
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная улица, д. 14, МЭИ (ТУ), каф. "Электрические и электронные аппараты"  
тел. +7 (495) 362-78-35, e-mail: jun7@mail.ru

*У даній статті розглядається регулятор потоку потужності з використанням фотоелектричного перетворювача (ФЭП). Розглянуті методи збільшення ефективності використання фотоелектричних перетворювачів. Робота проводиться на кафедрі "Електричні і Електронні апарати" Московського Енергетичного інституту (Технічного університету).*

*В данной статье рассматривается регулятор потока мощности с использованием фотоэлектрического преобразователя (ФЭП). Рассмотрены методы увеличения эффективности использования фотоэлектрических преобразователей. Работа проводится на кафедре "Электрические и Электронные аппараты" Московского Энергетического института (Технического университета).*

При создании систем электроснабжения (СЭС) объектов малой и средней мощности, которые не имеют возможности подключения к существующим электрическим сетям, либо подключены к сетям, где имеется дефицит электрической мощности, встает вопрос о применении генераторов электрической энергии. Наиболее распространенным способом решения этих проблем является применение электромеханических генераторов с приводом от двигателя внутреннего сгорания.

Автономные системы на основе электромеханических генераторов имеют следующие недостатки:

- необходимость поставки топлива и горюче-смазочных материалов;
- необходимость проведения ТО, и высокая квалификация обслуживающего персонала;
- необходимость шумоизоляции;
- необходимость отвода выхлопных газов.

В случае систем работающих совместно с сетью, где имеется дефицит электрической мощности в системах с использованием резервных электромеханических генераторов, кроме перечисленных выше, возникают следующие недостатки:

- невозможность синхронной работы с сетью и как следствие невозможность компенсации только дефицита мощности;
- существенное время, необходимое для переключения на электромеханический генератор;
- при обеспечении бесперебойного питания из-за использования ИБП сильно возрастает цена всей системы.

Устранить все эти недостатки можно путем использования систем на базе фотоэлектрических преобразователей. Отметим преимущества и недостатки использования СЭС на базе ФЭП.

- Полная независимость от распределительных электрических сетей. В солнечные дни обеспечивается гарантированная выработка электроэнергии для текущих нужд и заряда АБ.

- Фотоэлектрические модули практически не требуют обслуживания, за исключением периодического очищения от пыли и снега.
- Для круглосуточной работы потребителей электрической энергии в СЭС на базе ФЭП обязательно должны присутствовать аккумуляторные батареи (АБ), контроллеры заряда и разряда АБ и при необходимости питания нагрузки переменным напряжением инвертор.

Для решения проблем качества электроэнергии, а так же для обеспечения бесперебойного питания потребителей при кратковременных исчезновениях сетевого напряжения, наиболее оправданным выглядит использование регулятора потока мощности с использованием ФЭП, схема которого представлена на рис. 1.

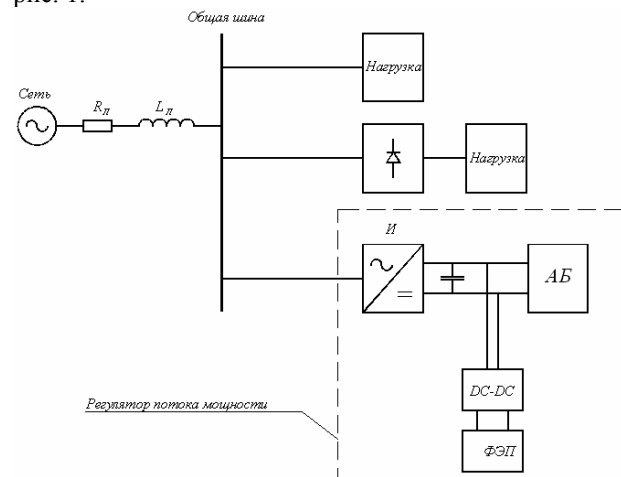


Рис. 1

Данный регулятор может работать, как совместно с сетью, так и в автономном режиме.

При наличии сетевого напряжения инвертор И выполняет функции активного фильтра, который осуществляет: фильтрацию высших гармоник, создаваемых нелинейными потребителями. Кроме того, инвертор может использоваться как компенсатор ре-

активной мощности, обусловленной основными гармониками напряжения сети и тока потребителей.

При исчезновении сетевого напряжения преобразователь И переходит из режима активного фильтра в режим инвертора, питающего нагрузку от резервных ФЭП и АБ при минимальных динамических отключениях на потребителях.

Несомненно, такой регулятор имеет преимущество перед электромеханическими преобразователями, но основной силой, которая сдерживает его широкое применение, является высокая стоимость первичных источников, солнечных батарей, так на данный момент, стоимость ФЭП мощностью 1 Вт составляет порядка 150 р. Одним из способов снижения стоимости полной системы является увеличение мощности отбираемой от элементарной ячейки одного ФЭП, что приведет уменьшению количества используемых ячеек ФЭП. В связи с этим наиболее важным элементом всей системы, является подсистема "dc-dc преобразователь – ФЭП". Рассмотрим более подробно эту подсистему.

Отметим основные особенности источника

- нелинейность внешних характеристик;
- малое выходное напряжение элементарной ячейки;
- неравномерность освещенности элементов или модулей батареи.

Ввиду перечисленных особенностей становится ясно, что наиболее подходящей для работы с ФЭП является топология мультиконвертера представленная на рис. 2.

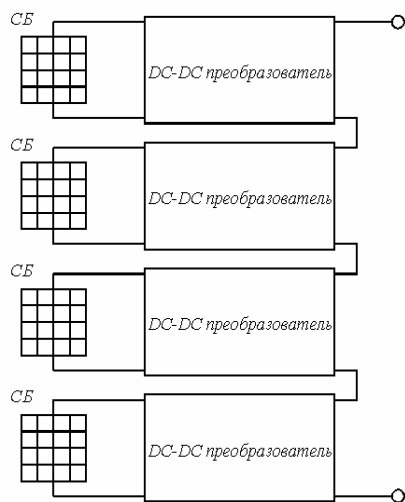


Рис. 2

Топология мультиконвертера обладает следующими преимуществами перед классической топологией:

- более эффективное использование ячеек;
- большая эффективность при работе с частично затененной батареей;
- контроль и управление выходными параметрами отдельной ячейки.

Для оценки работы мультиконвертера сравним результаты, полученные при моделировании системы с одним преобразователем и мультиконвертера, в программном комплексе OrCad 9.2. Модель состоит из

ФЭП, преобразователей постоянного тока, соединенных по топологии мультиконвертера и системы управления осуществляющей работу преобразователей с отбором максимальной мощности.

На рис. 3 представлена зависимость мощности передаваемой в нагрузку от уровня освещенности половины батареи, при условии, что освещенность второй половины батареи постоянна.

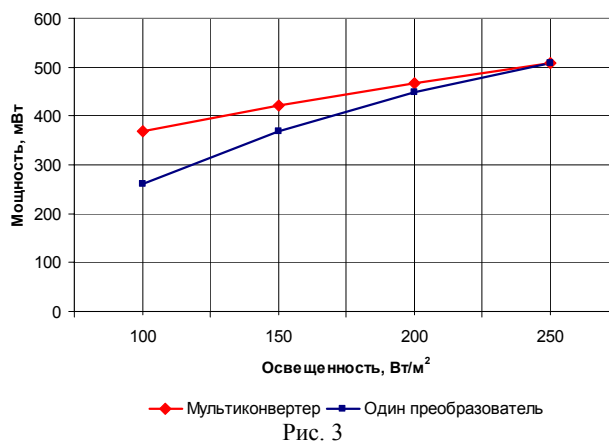


Рис. 3

Сравнивая полученные графики можно сделать вывод о том, что топология мультиконвертера позволяет отбирать от источника большую мощность при неравномерной освещенности по сравнению с топологией, где используется один преобразователь.

На кафедре "Электрические и электронные аппараты" создан макет, состоящий из трех плат на которых размещаются: система управления, драйверы и регуляторы напряжения

Система управления состоит из комплекта "Starter kit" на базе микропроцессора Motorola MC68HC908GZ16. В состав микроконтроллера входят: два двухканальных 8-ми разрядных таймерных модуля, модуль 10-ти разрядного АЦП.

Плата драйверов обеспечивает гальваническую развязку между каналами таймера микроконтроллера, а также обеспечивает уровень выходных сигналов достаточных для управления ключами регуляторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Электрические и электронные аппараты. Под ред. Ю.К. Розанова, М: Информэлекро, 2001. – 420 с.
- [2] Основы силовой электроники. / Розанов Ю. К. М: Энергоатомиздат, 1992.
- [3] Разевиг В.Д. Система проектирования OrCad 9.2. – М.: СОЛОН-Р, 2003.

Поступила 07.09.2006



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НАГРЕВА СЛОЯ ВОЗДУХА МЕЖДУ НАГРЕВАТЕЛЕМ И ИЗДЕЛИЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВАТЕЛЯ ПО ПЕРИОДИЧЕСКОМУ ЗАКОНУ

Себко В.В., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. "Химическая техника и промышленная экология"  
тел. (0572) 707-62-57, факс (0572) 70-76-602, e-mail: sebko@kpi.kharkov.ua

*Досліджено перехідний процес нагрівання шару повітря між нагрівачем і виробом при зміні температури нагрівача по періодичному закону. Для конкретного випадку знайдені рішення рівняння теплового балансу, які описують перехідний процес нагрівання повітряного шару між обмоткою нагрівача та виробом: загальне стаціонарне рішення  $\Delta t_B^*$ , особисте нестационарне рішення  $\Delta t_B^{**}$  та загальне  $\Delta t_B$ . Побудовано залежності величин  $\Delta t_B^*$ ,  $\Delta t_B^{**}$ ,  $\Delta t_B$  від часу нагрівання  $\tau$ .*

*Исследован переходный процесс нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием при изменении температуры нагревателя по периодическому закону. Для конкретного случая найдены решения уравнения теплового баланса, описывающего переходный процесс нагрева слоя воздуха между обмоткой нагревателя и изделием: общее стационарное решение  $\Delta t_B^*$ , частное нестационарное решение  $\Delta t_B^{**}$  и полное решение  $\Delta t_B$ . Построены зависимости величин  $\Delta t_B^*$ ,  $\Delta t_B^{**}$ ,  $\Delta t_B$  от времени нагрева  $\tau$ .*

### ВВЕДЕНИЕ

В современной литературе достаточно хорошо исследованы статические характеристики трансформаторных и параметрических вихретоковых датчиков (ТВД и ПВД) [1-6] для контроля геометрических, магнитных и электрических параметров немагнитных и ферромагнитных изделий широкого ассортимента.

В работах [6-7] приведен расчет ожидаемых значений сигналов ПВД с нагреваемым изделием и предложен трёхпараметровый метод определения магнитной проницаемости  $\mu_r$ , радиуса  $a$  и температуры  $t$  цилиндрического изделия.

Однако, в работах [1-7] не рассматривались динамические характеристики вихретоковых преобразователей, что в свою очередь не позволяло рассматривать переходные процессы электромагнитных преобразователей (бесконтактных и контактных). В последнее время появились работы [10, 11], в которых рассматриваются динамические процессы нагрева слоя воздуха и изделия при скачкообразном изменении температуры нагревателя и воздушного полого цилиндра, находящегося между изделием и нагревателем. В работе [12] получены численные значения постоянных времён намагничивающих обмоток ТВД и ПВД. Следует отметить, что для того, чтобы получить полную картину переходного процесса необходимо исследовать динамические характеристики нагрева слоя воздуха при изменении температуры нагревателя по периодическому закону.

Целью работы является исследование переходного процесса нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием при изменении температуры нагревателя по периодическому (синусоидальному) закону. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- найти значения общего стационарного решения  $\Delta t_B^*$  (амплитуды приращения температуры слоя воздуха), частного нестационарного решения  $\Delta t_B^{**}$ , а также определить полное решение  $\Delta t_B$  дифференциального уравнения, описывающего процесс нагрева слоя воздуха между изделием и нагревателем при изменении температуры нагревателя по периодическому закону.

- построить зависимости  $\Delta t_B^*$ ,  $\Delta t_B^{**}$ ,  $\Delta t_B$  от времени нагрева  $\tau$ .

Сам переходный процесс нагрева слоя воздуха характеризуется тремя решениями дифференциального уравнения теплового баланса, описывающего нагрев воздушного слоя. При этом частное решение характеризует нестационарный (затухающий) режим нагрева слоя воздуха, стационарный режим работы (стационарное решение) характеризует собой постоянный незатухающий синусоидальный режим нагрева. Сумма нестационарного и стационарного решения дает полное решение уравнения теплового баланса, описывающего нагрев слоя воздуха между изделием и нагревателем.

### 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НАГРЕВА СЛОЯ ВОЗДУХА МЕЖДУ НАГРЕВАТЕЛЕМ И ИЗДЕЛИЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВАТЕЛЯ ПО ПЕРИОДИЧЕСКОМУ ЗАКОНУ

Воспользовавшись результатами работ [10, 11, 12], в которых получены формулы и численные значения тепловой постоянной времени  $T_B$  и времени установления процесса нагрева  $\tau_{уст}$  воздушного трубчатого цилиндра, а также численное значение

температуры нихромовой проволоки, зная циклическую частоту нагревателя, которая определяет цикл нагревания воздушного цилиндра [11, 12], запишем нестационарное дифференциальное уравнение теплового баланса, характеризующее нагрев слоя воздуха между нагревателем и изделием с учетом [8, 10, 11].

$$T_B \cdot \Delta t'_B + \Delta t_B = \Delta t_{mH} \cdot \sin \omega_H \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $\Delta t_{mH}$  - амплитудное значение приращения температуры нагревателя,  $\omega_H$  - циклическая частота изменения  $\Delta t_H$ ,  $T_B$  - тепловая постоянная времени слоя воздуха между нагревателем и изделием.

Будем искать решение уравнения (1) в виде двух частей. Стационарная общая часть  $\Delta t_B^*$  решения выражается в виде

$$\Delta t_B^* = \Delta t_{mH} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau}. \quad (2)$$

Применив символический метод операций с комплексными величинами [9] запишем дифференциальное уравнение (1) в виде

$$T_B \frac{d(\Delta t_{mB} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau})}{d\tau} + \Delta t_{mB} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau} = \Delta t_{mH} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau}, \quad (3)$$

где  $\Delta t_{mB}$  - амплитудное значение приращения температуры воздушного цилиндра. Отсюда

$$j\omega_H \cdot T_B \cdot \Delta t_{mB} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau} + \Delta t_{mB} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau} = \Delta t_{mH} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau}. \quad (4)$$

Разделив обе части (4) на сомножитель  $e^{j\omega_H \cdot \tau}$ , найдем, что

$$j\omega_H \cdot T_B \cdot \Delta t_{mB} + \Delta t_{mB} = \Delta t_{mH}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что

$$\Delta t_{mB} (1 + j\omega_H \cdot T_B) = \Delta t_{mH}. \quad (6)$$

Амплитудное значение приращения температуры воздушного цилиндра можно определить по формуле

$$\Delta t_{mB} = \frac{\Delta t_{mH}}{1 + j\omega_H \cdot T_B}. \quad (7)$$

Формула (7) дает возможность найти модуль приращения  $\Delta t_{mB}$  в виде

$$|\Delta t_{mB}| = \frac{\Delta t_{mH}}{|1 + j\omega_H \cdot T_B|} = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}}. \quad (8)$$

Примем значение частоты нагревателя  $f_H = 0,1$  Гц, изменение приращения температуры нагревателя  $\Delta t_H = \Delta t_{mH} = 101,2$  °C [11].

Зная циклическую частоту нагревателя, которая определяет цикл нагревания воздушного цилиндра  $\omega_H = 0,628$  1/с [11] и зная найденное ранее значение постоянной времени  $T_B$  [12], можно определить модуль приращения  $\Delta t_{mB}$

$$|\Delta t_{mB}| = \frac{101,2}{\sqrt{1 + (0,628)^2 \cdot (0,6275)^2}} = 94,153 \text{ °C}.$$

Фазовый угол  $\varphi_B$  найдем из выражения

$$\varphi_B = \arctg(-\omega_H \cdot T_B). \quad (9)$$

Знак "-" в (9) свидетельствует о том, что приращение  $\Delta t_B$  отстает по фазе от приращения  $\Delta t_H$ .

$$\varphi_B = \arctg(-0,628 \cdot 0,6275) = -21,507 \text{ град}.$$

В табл. 1 приведены исходные [11] и расчетные данные тепловых параметров воздушного слоя между изделием и нагревателем.

В итоге стационарное решение дифференциального уравнения (1) запишем с учетом (2), (8), (9) в виде

$$\Delta t_B^* = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(\omega_H \cdot \tau - \varphi_B). \quad (10)$$

$$\Delta t_B^* = 13,902 \text{ °C}.$$

Для определения частного (нестационарного) решения уравнения (1) на основании соотношений, полученных в [10, 11, 12], запишем

$$\Delta t_B^{**} = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot e^{-\tau/T_B} \cdot \sin \varphi_B. \quad (11)$$

$$\Delta t_B^{**} = 94,153 \cdot e^{-0,839/0,6275} \cdot \sin(-21,507) = 9,15 \text{ °C}.$$

В общем случае с учетом [10, 11] полное решение уравнения (1) запишем в виде

$$\Delta t_B = \Delta t_B^* + \Delta t_B^{**} = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(\omega_H \cdot \tau - \varphi_B) + A \cdot e^{-\tau/T_B}. \quad (12)$$

Задавшись начальными условиями, т.е. при  $\tau = 0$  приращения температуры воздушного цилиндра  $\Delta t_B = 0$ , получим на основании (9) выражение для определения коэффициента  $A$ , который характеризует, на сколько уменьшается амплитуда приращения температуры слоя воздуха  $\Delta t_B$  по сравнению с амплитудой приращения температуры нагревателя  $\Delta t_H$

$$0 \approx \Delta t_B^* + \Delta t_B^{**} = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(-\varphi_B) + A. \quad (13)$$

Отсюда

$$A = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin \varphi_B. \quad (13)$$

$$A = 94,153 \cdot \sin(21,507) = 34,517 \text{ °C}.$$

Теперь можно найти мгновенные значения  $\Delta t_B^*$ ,  $\Delta t_B^{**}$  и  $\Delta t_B$  температуры воздушного цилиндра при синусоидальном во времени изменении приращения  $\Delta t_H$  температуры нагревателя, используя зависимости на рис. 1, т.е. распределения по времени приращения температуры  $\Delta t_B^*$ ,  $\Delta t_B^{**}$  и  $\Delta t_B$  слоя воздуха

Зная  $A$  общее решение  $\Delta t_B$ , определим по формуле

$$\Delta t_B = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(\omega_H \cdot \tau - \varphi_B) + \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(\varphi_B) \cdot e^{-\tau/T_B}. \quad (15)$$

Или в итоге получим

$$\Delta t_B = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot [\sin(\omega_H \cdot \tau - \varphi_B) + e^{-\tau/T_B} \cdot \sin(\varphi_B)] \quad (16)$$

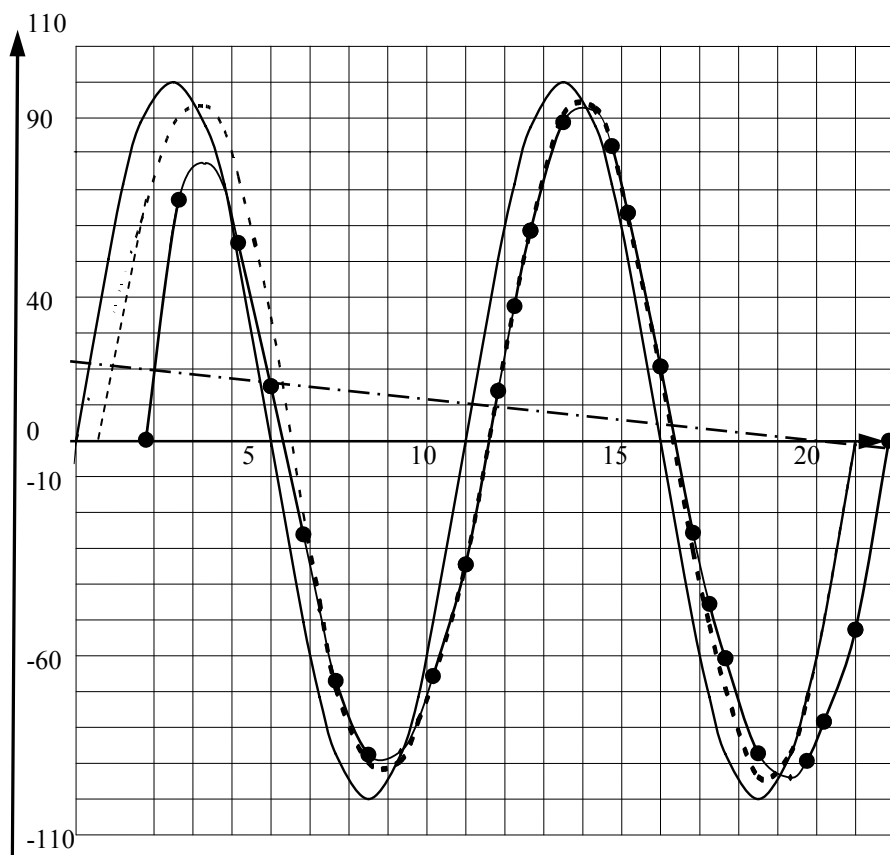


Рис. 1. Зависимости:  $\Delta t_H$ ,  $\Delta t_B^*$ ,  $\Delta t_B^{**}$  и  $\Delta t_B$  от  $\tau$ :  
 —  $\Delta t_H$ ; - - -  $\Delta t_B$ ; ● —  $\Delta t_B^*$ ; - · - · -  $\Delta t_B^{**}$

Для угла  $\omega_H \cdot \tau = 1/6\pi$  (табл. 2) при заданной частоте  $f_H = 0,1$  Гц имеем

$$\Delta t_B = 94,153 \times [\sin(8,49118) + e^{-0,839/0,6275} \cdot \sin(-21,507)] = 23,05 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для того, чтобы определить время  $\tau_{уст}$  по каждой строке табл. 2, необходимо при заданной частоте  $f_H$  разделить соответствующий угол  $\omega_H \tau$  в радианах на  $2\pi f_H$ , например, когда  $\omega_H \cdot \tau = 1/6\pi$ , тогда

$$\tau_{уст} = \frac{1/6\pi}{2\pi \cdot f_H} = \frac{1}{12f_H}. \quad (17)$$

Для данного угла  $\tau_{уст}$  составило

$$\tau_{уст} = 0,833 \text{ с}.$$

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таким образом, исследован переходный процесс нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием при изменении температуры нагревателя по периодическому (синусоидальному) закону. Найдены численные значения общего стационарного решения  $\Delta t_B^* = 13,902 \text{ } ^\circ\text{C}$ , частного нестационарного решения  $\Delta t_B^{**} = 9,15 \text{ } ^\circ\text{C}$  и полного решения дифференциального уравнения, описывающего процесс нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием  $\Delta t_B = 23,05 \text{ } ^\circ\text{C}$  для конкретного угла  $\omega_H \cdot \tau = 1/6\pi$  (табл. 2). Следует отметить, что при больших значениях  $\omega_H \tau$  полное

решение переходит в стационарный режим (рис. 1).

На рис. 1 представлены зависимости  $\Delta t_H$ ,  $\Delta t_B^*$ ,  $\Delta t_B^{**}$  и  $\Delta t_B$  от времени нагрева  $\tau$ , которые получены с использованием формулы (16).

Как видно из соотношения (16) и рис. 1, пунктирной линией нанесена кривая зависимости приращения  $\Delta t_B$  температуры воздушного цилиндра от времени  $\tau$ . Эта кривая начинается с нуля времени и равна нулю, так как при  $\tau = 0$  и  $\Delta t_B = 0$  (см. (16)), сложение двух кривых  $\Delta t_B^*$  и  $\Delta t_B^{**}$  приводит к тому, что в первых полупериодах  $\Delta t_B$  превосходит  $\Delta t_B^*$  (стационарное решение). При дальнейшем увеличении времени  $\tau$ , благодаря уменьшению по экспоненте нестационарного решения, т.е.  $\Delta t_B^{**}$ , со временем зависимость  $\Delta t_B$  переходит в стационарную синусоиду  $\Delta t_B^*$  (см. на рис. 1 слияние пунктирной кривой со сплошной линией  $\Delta t_B^*$ ).

Из формулы (8) и рис. 1 следует также, что в воздушном цилиндре амплитуда приращения  $\Delta t_{mv}$  стационарного изменения температуры уменьшается с  $101,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  до  $94,153 \text{ } ^\circ\text{C}$  по сравнению с амплитудой приращения  $\Delta t_{mH}$  нагревателя и  $\Delta t_B$  отстает по фазе от  $\Delta t_H$  на угол  $\varphi_B = -21,507$  град.

Таблица 1

Значения тепловых параметров воздушного цилиндра между изделием и нагревателем

$\Delta t_{mn}$ , °C	$f$ , Гц	$\omega_n$ , 1/с	$T_B$ , с	$\Delta t_{mv}$ , °C	$\Phi_B$ , град	$tg\Phi_B$	$A$
101,2	0,1	0,628	0,6275	94,153	-21,507	-0,394	34,517

Таблица 2

Зависимости  $\Delta t_n$ ,  $\Delta t_B^*$ ,  $\Delta t_B^{**}$  и  $\Delta t_B$  от  $\tau$

$\tau$ , с	$\omega_n \tau$ , рад	$\Delta t_n$ , °C	$\Delta t_B^*$ , °C	$\Delta t_B^{**}$ , °C	$\Delta t_B$ , °C
0	0	0	0	0	0
0,83	1/6π	50,58	13,90	9,15	23,05
1,25	1/4π	71,55	37,54	4,70	42,25
1,66	1/3π	87,42	58,30	2,44	60,75
2,5	1/2π	101,2	87,60	0,64	88,24
3,33	2/3π	87,74	93,14	0,17	93,31
3,75	3/4π	11,55	86,34	0,08	86,42
4,16	5/6π	50,63	73,70	0,04	73,75
5	1π	0	34,50	0,01	34,51
5,83	1 1/6π	-50,58	-13,90	0,003	-13,89
6,25	1 1/4π	-71,55	-37,54	0,001	-37,54
6,66	1 1/3π	-87,42	-58,90	0,0008	-58,30
7,5	1 1/2π	-101,2	-87,60	0,0002	-87,60
8,33	1 2/3π	-71,55	-93,12	5·10 <sup>-5</sup>	-93,11
8,75	1 3/4π	-50,63	-86,34	3·10 <sup>-5</sup>	-86,34
9,16	1 5/6π	-50,9	-73,70	1·10 <sup>-5</sup>	-73,70
10	2π	0	-34,50	4,1·10 <sup>-6</sup>	-34,50
10,83	2 1/6π	50,58	13,90	1,09·10 <sup>-6</sup>	13,90
11,25	2 1/4π	71,55	37,54	0,5·10 <sup>-6</sup>	37,54
11,66	2 1/3π	87,42	58,58	0,2·10 <sup>-6</sup>	58,58
13,33	2 2/3π	88,68	93,14	2,04·10 <sup>-8</sup>	93,14
13,75	2 3/4π	71,55	86,34	1,05·10 <sup>-8</sup>	86,34
14,16	2 5/6π	50,63	73,70	5,4·10 <sup>-8</sup>	76,70
15	3π	0	34,50	1,4·10 <sup>-9</sup>	34,50
15,83	3 1/6π	-50,58	-13,90	3,8·10 <sup>-9</sup>	-13,90
16,25	3 1/4π	-71,55	-37,54	1,9·10 <sup>-10</sup>	-37,54
16,66	3 1/3π	-85,44	-58,58	1,007·10 <sup>-10</sup>	-58,58
17,5	3 1/2π	-101,2	-87,60	2,6·10 <sup>-11</sup>	-87,60
18,33	3 2/3π	-88,68	-93,12	7,07·10 <sup>-11</sup>	-93,12
18,75	3 3/4π	-71,55	-86,34	3,6·10 <sup>-12</sup>	-86,34
19,16	3 5/6π	-50,96	-73,70	1,8·10 <sup>-12</sup>	-73,70
20	4π	0	-34,50	4,9·10 <sup>-13</sup>	-34,50

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пантелеев М.С., Себко В.П. К теории работы двухпараметрового вихретокового преобразователя для контроля трубчатых проводящих изделий. – Харьков. – Деп. в УкрНИИТИ, 1985. – 1560. Деп. – 21 с.
- [2] Себко В.П., Хоменко В.Г. К расчету компонентов сигналов электромагнитного преобразователя с трубчатым проводящим изделием // Вестник ХГПУ, Харьков, ХГПУ, 2000, вып. 92. - С. 76-80.
- [3] Себко В.П., Москаленко И.И., Горкунов Б.М. Определение выходных сигналов параметрического преобразователя. Материалы научно-технической конференции с международным участием "Проблемы автоматизированного электропривода". – Харьков. - 1996, С.199-200.
- [4] Себко В.П., Горкунов Б.М., Ду Хиан Янг. К расчету ожидаемых значений компонентов сигналов многопараметрового электромагнитного преобразователя // Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ"ХПИ", № 9, Т.4. - 2002, С. 115-118.
- [5] Себко В.П., Мохаммад Махмуд Дарвиш. Погрешности определения электромагнитных параметров и потерь мощности в сплошном цилиндрическом изделии. – Техническая электродинамика. Тематический выпуск. - Ч.1. – Киев, 2001.- С. 99-104.
- [6] Себко В.П., Горкунов Б.М., Котуза А.И. Параметрический электромагнитный преобразователь температуры // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. Вып. 6. – Ч.2. – 1998. - С. 301-308.
- [7] Себко В.П., Котуза А.И. Новый трёхпараметровый метод определения электромагнитных параметров и температуры на основе вносимого полного сопротивления датчика. // "Интегрированные технологии и энергосбережение", - НТУ "ХПИ" - 2006 – С. 73-76.
- [8] Теплотехника / Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. Школа, 2000. – 672 с.
- [9] Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. – М.: Госэнергиздат, ч. II, 1959. – 444 с.
- [10] Себко В.В. Динамические характеристики теплового преобразователя с нагреваемым цилиндрическим изделием. Материалы международной научно-технической конференции "Силовая электроника и энергоэффективность". – Киев (г. Алушта), 2001.- С. 108-113.
- [11] Себко В.В. Нагрев воздушного кольцевого слоя в проходном электромагнитном преобразователе. // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. XIV Международная научно-практическая конференция. – ХТУ "ХПИ". - Харьков. – 2006. - С. 119-124.
- [12] Себко В.В. Определение постоянной времени намагнивающей обмотки электромагнитного преобразователя. – Радиоэлектроника и информатика. – ХНУРЭ. – Вып. 3. – 2006. – С. 12-15.

Поступила 05.09.2006

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ НА АЭС, ГЭС И ТЭС

Шумилов Ю.А. д.т.н., проф.  
Национальный технический университет Украины, "Киевский политехнический институт",  
кафедра электромеханики, Украина, 03056, Киев, пр. Победы, 37,  
тел. (044) 241-76-38, e-mail: yuriy2007@voliacable.com

Пономаренко В.К.  
"Аристок", Украина, Киев, тел. (044) 236-76-70, e-mail: sircobol@voliacable.com

Кузьмин В.В. д.т.н., проф.,  
Государственное предприятие завод "Электротяжмаш", Украина, 61055, Харьков, пр. Московский, 299,  
тел.(0572) 95-66-81, e-mail: etm@spetm.com.ua

Демидюк Б.М.,  
ЗАО "Укратомэнергострой", Украина, 03035, Киев, ул. Урицкого, 45, оф. 606  
тел. (044) 590-17-63, e-mail: uaeb@ukr.net

*Обґрунтовується необхідність моніторингу і діагностики технічного стану потужних генераторів у реальному часі для попередження аварій. Пропонується відмовитися від планово-попереджувальних ремонтів на користь ремонтів за фактом суттєвого відхилення показників надійності від норми.*

*Обосновывается необходимость мониторинга и диагностики технического состояния мощных генераторов в реальном времени для предупреждения аварий. Предлагается отказаться от планово-предупредительных ремонтов в пользу ремонтных по факту существенного отклонения показателей надёжности от нормы.*

Надёжность любого изделия – главный его показатель. Это настолько очевидно, настолько само собой разумеется, что наступает момент, когда об этом (парадоксально, но факт) начинают забывать и вспоминают только после наступления отказов и аварий.

В настоящее время не только в Украине, но и в мире в целом наступает период исчерпания эксплуатационного ресурса многих промышленных и, что самое главное, энергетических систем. В ближайшие годы планируется обновление и строительство новых энергоустановок, в первую очередь в области "зеленой" энергетики и объектов так называемого "распределённого генерирования" ("dispersed generation"). До ввода в строй нового оборудования необходимо продлить остаточный ресурс находящихся в эксплуатации турбо- и гидрогенераторов. Эта проблема и определила основную тематику докладов рабочей группы А1 "Вращающиеся электрические машины" на прошедшей сессии СИГРЭ-2006 и на запланированной в 2008 г. Для энергетики Украины особо важно решение рассматриваемой проблемы для генераторов АЭС, обеспечивающих более 50 % выработки электроэнергии, а также гидрогенераторов ГЭС и ГАЭС, которые представляют собой основу регулирования частоты в энергосистемах.

В связи с этим нужно пересмотреть не только подход к методам и средствам неразрушающего контроля и диагностики, но и к методике обеспечения надёжности на всех этапах жизненного цикла изделия: технического задания, проектирования, конструирования, изготовления, монтажа, эксплуатации, ремонта и обкатки.

Во вновь создаваемые энергетические установки нужно закладывать максимально возможный эксплуатационный ресурс, начиная с этапа проектирования.

### С чего начинается старение?

Ответ простой: с момента зарождения изделия, т. е. с выбора варианта решения. Самые большие успехи (или промахи) определяются при **проектировании**, при формировании принципов построения систем. Здесь, в буквальном смысле, "кадры решают всё", причём дело не в количестве, а в качестве проектировщиков: талантливых, с развитой интуицией и богатым опытом. Это самый творческий этап, практически не поддающийся формализации.

На следующем шаге проявляется талант **конструкторов**, но некоторые рабочие моменты уже могут быть формализованы. В частности, разработку конкретных вариантов конструкции возможно описать математически и сделать соответствующую компьютерную модель. Первый опыт разработки систем автоматизированного проектирования (САПР) относится ещё к началу 1970-х годов. К настоящему времени разработаны эффективные средства многоаспектного моделирования электромеханических систем.

Фактически **диагностика** электроустановок может и должна начинаться на этапе конструирования и предшествовать созданию устройств в металле. Речь идёт об установлении зависимостей шумов, вибраций, тепловых и электромагнитных полей от геометрических параметров и типа конструкций, и о выборе оптимального решения по заданным критериям.

При **изготовлении** электрогенераторов в обеспечении надёжности роль методов неразрушающего

контроля (НК) и технической диагностики (ТД) существенно возрастает. Измерение и комплексный анализ физических полей, рентгеновский, акустический и многие другие виды контроля элементов конструкции позволят на этапе производства выявлять дефекты в работе машины, устанавливать причины их возникновения и принимать меры по доводке изделия.

**Обкатка** установок после монтажа оборудования должна сопровождаться применением всех методов НК и ТД, т. е. условия работы генератора на электростанции не идентичны испытательным режимам на заводском стенде. Кроме того, могут возникнуть дополнительные дефекты при транспортировке и, особенно, при монтаже.

Для отработанной конструкции мощного генератора на первом этапе жизненного цикла объем контроля и мониторинга нужно сводить к разумному минимуму, чтобы снизить до предела интеллектуальную нагрузку на оперативный персонал, одновременно увеличивая степень автоматизации мониторинга основных параметров.

**Эксплуатация** электрогенераторов выполняется при обязательном мониторинге основных параметров установки, однако полнота и детальность анализа изношенного оборудования должны быть существенно выше, чем при эксплуатации нового. Не исключено, что на определенном этапе потребуется тотальная проверка сварных соединений и других мест в системе. Это потребует дополнительных расходов, но "чем больше возраст, тем дороже лекарства".

Экономия на такого рода профилактике может обернуться огромными потерями. Примером может служить авария на японской АЭС (с человеческими жертвами), вызванная дефектом в одной из труб, которую не проверяли на протяжении 30 лет. Как следствие, были выведены из эксплуатации для полной ревизии 17 из 53 блоков АЭС.

Приближение к исчерпанию ресурса установки характерно тем, что ресурсы подсистем, узлов и отдельных деталей различны; именно это является причиной внезапных, неожиданных отказов системы. Система планово-профилактических ремонтов (ППР) становится неэффективной. У отказов свои "планы".

Поэтому в энергетике передовых стран намечается тенденция к переходу от ППР к техническому обслуживанию "по фактическому состоянию", что дает значительный экономический эффект не только за счет повышения надежности самого оборудования в процессе эксплуатации, но также и вследствие расходов на его ремонтное обслуживание.

При подходе к периоду исчерпания расчетного ресурса объем контроля и диагностики (включая и ремонтную) неизбежно будет увеличиваться, поэтому необходимо:

- переносить центр тяжести мониторинга на выполнение защитных функций в критических ситуациях,
- больше внимания уделять параметрам вибро-механического состояния, в первую очередь – для быстроходных турбогенераторов.

Если по электрическим параметрам последняя задача имеет приемлемое решение (в самых тяжелых

ситуациях повреждения локализируются внутри корпуса машины), то в области мониторинга вращающихся роторов – "непаханое поле". Аварии новосибирских турбогенераторов серии ТВМ, которые произошли вследствие разрушения узлов ротора в 2002 г. на Каширской ТЭС и в 2006 г. на Рефтинской ТЭС привели к полному разрушению турбоагрегатов 300 и 500 МВт соответственно.

Для того, чтобы упреждать отказы и аварии, необходимо внимательно "прислушиваться" и "присматриваться" к работающей системе с тем, чтобы улавливать аномалии в её поведении ещё на стадии зарождения причин отказов. Следовательно, количество точек контроля должно быть больше, а чувствительность измерительного тракта и разрешающая способность анализаторов существенно выше, чем в настоящее время. Кроме того, алгоритмы первичной и, особенно, вторичной обработки данных должны быть адаптированы к характеру физических процессов в электрогенераторе. Фактически нужно непрерывно, в реальном времени сравнивать фактическое состояние агрегата с его параметрами, рассчитанными при математическом моделировании.

Результаты мониторинга (как "сырые" данные, так и результаты обработки) должны непрерывно регистрироваться в специализированной компьютерной базе данных. Они представляют собой большую ценность не только для эксплуатационников, но также для проектировщиков и изготовителей оборудования. Современные технические возможности позволяют с минимальной задержкой во времени предавать информацию непосредственно в базы данных завода-изготовителя с тем, чтобы осуществлять независимый, объективный контроль работы установок.

Кроме того, на основании обобщенных данных можно будет выработать стандартные требования к номинальным значениям параметров, характеризующих нормальную работу установки.

**Для обеспечения мониторинга, упреждающего отказы оборудования, следует:**

- поставить задачу по моделированию физических полей электрогенераторов;
- определить перечень контролируемых параметров;
- разработать структуру базы экспериментальных данных для системы мониторинга;
- сформулировать (в первом приближении) критерии оценки отклонений параметров от номинальных значений;
- разработать техническое задание на многоканальную систему ввода и регистрации данных;
- для предварительной оценки состояния энергоустановок создать мобильные универсальные лаборатории неразрушающего контроля и диагностики;
- после выполнения предварительных исследований сформулировать ТЗ и создать типовые системы постоянного мониторинга на всех электрогенераторах;
- создать аналогичные системы контроля на заводах-изготовителях;
- обязательными требованиями к системе мониторинга должны быть:

- открытость структур данных в базе;
- открытость критериев нормальной работы установки;
- открытость алгоритмов вычисления отклонений от нормы;
- автономность локальной сети мониторинга (отсутствие прямого выхода в Интернет);
- возможность динамического изменения структуры данных с сохранением преемственности баз данных;
- **Особую ценность** представляют результаты всестороннего анализа оборудования, выведенного из эксплуатации в результате отказа или аварии; при этом должны применяться не только методы НК, но и, при необходимости, следует препарировать элементы конструкций и деталей; предпочтительно также применять рентгеновскую диагностику и другие методы, которые обеспечивают выдачу прямых, а не косвенных данных о характере дефектов (микроскопию, капиллярный метод, вихретоковый и т. п.);
- должна быть проведена тотальная (полная) обработка имеющейся базы рентгеновских снимков, а также дополнительных снимков, необходимых для изучения причин отказа или аварии;
- заключения экспертов (дефектоскопистов, материаловедов, конструкторов, эксплуатационников и др.) следует заносить в базу данных, которая должна стать аккумулятором опыта по изучению и устранению ошибок, допускаемых на всех этапах: проектирование, конструирование, изготовление, эксплуатация, ремонт;
- специализированная система управления базой экспертиз должна обеспечивать накопление сводной (отраслевой) базы текстовой и графической информации и эффективный поиск в неструктурированных текстах; **семантический метод поиска, разработанный нами, на порядок уменьшает информационный шум и повышает точность поиска;** в критических ситуациях, например, в предаварийной обстановке, поиск необходимых сведений может оказаться жизненно важным для принятия операторами правильных решений по управлению сложными системами;
- для исследования износа деталей и изучения нарушений микроструктуры малогабаритных ответственных узлов должны быть разработаны системы промышленной рентгеновской томографии как одного из наиболее информативных инструментов контроля качества.

Последние десятилетия характеризуются резким возрастанием роли диагностической аппаратуры для контроля энергетического оборудования. Это связано с тем, что парк оборудования энергетических предприятий катастрофически устаревает. В ряде энергосистем до 60% установленного высоковольтного оборудования полностью исчерпали свой ресурс, что грозит лавинообразным увеличением числа техногенных аварий

и катастроф. Например, если в 1990 году их число составляло в России около 200, то уже к 1997 году оно увеличилось до 1200, и в настоящее время продолжает увеличиваться, а по прогнозам специалистов в ближайшие годы может еще более резко возрасти из-за наметившегося оживления промышленности.

Существуют два пути выхода из создавшегося положения: первый путь - радикальная замена устаревшего оборудования практически одновременно во всех энергосистемах, что в нынешних экономических условиях следует признать нереальным, и второй путь - интенсификация диагностических проверок оборудования с целью выявления аварийноопасных объектов и, как следствие, предупреждения аварий и обоснования сроков ремонтов.

Обзор публикаций в области диагностики энергетического оборудования и, в частности, рентгенографических методов диагностики будет дан в отдельной публикации в этом журнале.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Е.В. Кириевский, канд. техн. наук (ЮРГТУ (НПИ) Техническая диагностика энергетического оборудования: проблемы, тенденции, перспективы, журн. Кабель – Монтаж, Обзор статей девятого номера издания Кабель, 2007.
- [2] Стороженко В. А., Мешков С. Н., Маслова В. А. Тепло-визионный контроль и диагностика энергетического оборудования, журнал "Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль" №1, 2006 г., с. 33.
- [3] "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности". – Труды 3-ей Международной конференции и выставки. Москва. Центр Международной торговли; 17-19 марта 2004 г.
- [4] "Неразрушающий Контроль и Техническая Диагностика в Промышленности". – Труды 5-й Юбилейной международной конференции и выставки. Москва. Центр Международной торговли; 17-19 марта 2006 г.
- [5] "Неразрушающий контроль-2005" Труды 8-й конференции и выставки. ИЭС им. Е.О.Патона г. Киев; 19 - 22 апреля 2005 года.
- [6] Барков А.В., Баркова Н.А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации. Ассоциация ВАСТ, Россия, 198207, С-Петербург, пр. Стачек, д. 140 (Статья опубликована в выпуске трудов Петербургского энергетического института повышения квалификации Минтопэнерго Российской Федерации и Института вибрации США (Vibration Institute, USA), Выпуск 9, Санкт-Петербург, 1999 г.)
- [7] Баркова Н.А. Современное состояние виброакустической диагностики машин. – Публикация составлена по материалам курса лекций, читаемых автором в Санкт-Петербургском морском техническом университете, Россия. Ассоциация ВАСТ, Россия, 198207, С-Петербург, пр. Стачек, д. 140.
- [8] Барков А.В. Новое поколение систем мониторинга и диагностики машин. – Ассоциация ВАСТ, Россия, 198207, С-Петербург, пр. Стачек, д. 140.
- [9] Шумилов Ю. А., Пономарево В. К., Кузьмин В. В., Демидюк Б. М. Цветовое "проявление": качественно новый уровень рентгенодиагностики. Электротехника і Електромеханіка. 2007. №2, С. 59-62.

Поступила 20.11.2006

## ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРИФАЗНО-ОДНОФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ

Шуруб Ю.В., к.т.н.

Інститут електродинаміки НАН України  
Україна, 03680, Київ, пр-кт Перемоги, 56  
тел. (044) 454-26-37

*Запропоновано засіб покращення експлуатаційних властивостей трифазно-однофазних асинхронних електроприводів за рахунок використання комбінованих схем, розроблено математичну модель для аналізу динамічних процесів, що виникають в таких електроприводах внаслідок схемних перемикачів.*

*Предложен способ улучшения эксплуатационных свойств трехфазно-однофазных асинхронных электроприводов за счет использования комбинированных схем, разработана математическая модель для анализа динамических процессов, возникающих в таких электроприводах вследствие схемных переключений.*

Актуальним є питання підвищення експлуатаційних властивостей трифазних асинхронних двигунів (АД) з фазозсуваючими конденсаторами, що живляться від однофазної мережі – трифазно-однофазних електроприводів (ЕП). Такі електроприводи мають досить низьку кратність пускового моменту (0,3-0,5). Для отримання задовільного пускового моменту на період пуску паралельно робочому додають пусковий конденсатор, що знижує надійність електромеханічної системи, підвищує її вартість та масо-габаритні показники. Перехідні процеси при комутаціях пускового конденсатора супроводжуються появою екстраструмів в колі конденсаторів з великою швидкістю зростання струму, що призводить до зносу контактної апаратури та перешкоджає використанню в якості комутаторів напівпровідникових вентилів. В деяких випадках проблема може бути вирішена шляхом застосування комбінованої схеми включення ЕП, де використовується один (робочий) конденсатор, але різні схем вмикання силової частини ЕП (обмоток АД і конденсатора) в пусковому та робочому режимах [1].

Один із варіантів схеми такого комбінованого включення приведений на рис. 1. Пуск двигуна здійснюється при послідовно-паралельному включенні його обмоток (положення контактора К - 2), що має більший пусковий момент, ніж схема Штейнметца (положення контактора К - 1). Тоді як в робочому режимі обмотки двигуна вмикаються по схемі Штейнметца, що має кращі енергетичні показники в області номінальних ковзань. Така комбінована схема дозволяє отримати кратність пускового моменту 0,4-0,8. Додатковий тиристорний регулятор VS дозволяє регулювати швидкість двигуна в робочому режимі і величину пускового моменту.

Зацікавленість викликає перехідний процес, обумовлений комутацією силової частини системи в процесі пуску, оскільки в момент комутації виникає можливість значних динамічних поштовхів електромагнітного моменту двигуна та короточасних кидків струму. Мінімізація цих факторів через вибір оптимального закону керування перекомутацією силових схем сприятиме підвищенню експлуатаційних характеристик трифазно-однофазного електроприводу. Відомо, що максимальна амплітуда перехідного струму,

що виникає внаслідок зміни структури силової схеми, залежить від початкового значення струмів в колі статора, від фазового кута  $\varphi$  в момент комутації (кут комутації), що відраховується від моменту переходу кривої напруги через нуль, та фазового кута навантаження. Останній залежить від швидкості двигуна в момент комутації. Причому, в момент комутації джерелом зовнішньої енергії для силових кіл статора є не тільки мережа живлення, а й ЕРС обертання, обумовлене незатухшим полем ротора, що теж залежить від швидкості обертання двигуна. Отже, оптимальний закон керування перекомутацією силових схем визначається для заздалегідь вибраного значення швидкості моментом комутації, тобто фазовим кутом  $\varphi$ , при якому миттєвий кидок струму буде мінімальним, що через складність електромагнітних процесів в комбінованій схемі може бути визначений тільки методом математичного моделювання.

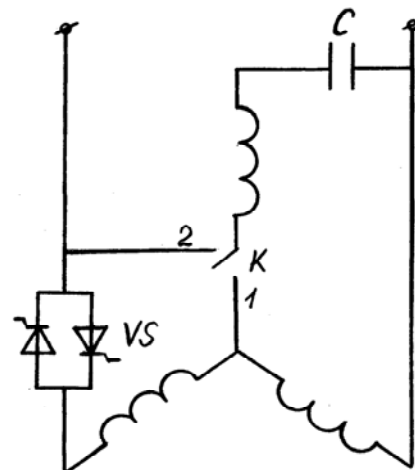


Рис. 1. Схема комбінованого включення трифазно-однофазного асинхронного електроприводу

Для аналізу перехідних процесів, що виникають при схемних перемиканнях, розроблена узагальнена математична модель трифазно-однофазного електропривода, де структура матричних диференціальних рівнянь електричної рівноваги незалежно від схеми з'єднання силової частини системи залишалась незмін-



ною, а зміна структури силового кола супроводжувалась тільки зміною коефіцієнтів диференціальних рівнянь, не порушуючи при цьому закони безперервності потокозчеплень двигуна та зарядів конденсатора.

В системі координат статора  $\alpha, \beta, 0$  електромеханічні процеси в АД описуються наступною системою рівнянь в матричній формі:

$$\begin{aligned} \bar{u}_s &= R_s \bar{i}_s + \sigma L_s D \bar{i}_s + \frac{L_m}{L_r} D \bar{\psi}_r; \\ 0 &= -R_r \frac{L_m}{L_r} \bar{i}_s + \frac{R_r}{L_r} \bar{\psi}_r + D \bar{\psi}_r + \omega \bar{\psi}_r; \\ M &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} (\bar{\psi}_\alpha^r i_\beta^s - \bar{\psi}_\beta^r i_\alpha^s); J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\bar{u}_s = |u_\alpha^s, u_\beta^s|^t$  - вектор напруг статора,  $\bar{i}_s = |i_\alpha^s, i_\beta^s|^t$  -

вектор струмів статора,  $\bar{\psi}_r = |\psi_\alpha^r, \psi_\beta^r|^t$  - вектор потокозчеплень ротора,  $L_s = L_m + L_{\sigma s}$ ,  $L_r = L_m + L_{\sigma r}$  - повні індуктивності статора і ротора;  $L_m$  - індуктивність намагнічуючого конура;  $L_{\sigma s}$  - індуктивність розсіювання статора;  $L_{\sigma r}$  - індуктивність розсіювання ротора,  $R_s, R_r$  - активні опори статора і ротора;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$  - коефіцієнт розсіювання;  $J$  - момент

інерції  $\bar{\omega} = \begin{vmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{vmatrix}$  - матриця, що визначає ЕРС обертання,  $D$  - символ диференціювання по часу.

Для вирішення системи (1) необхідно виразити вектор напруг статора  $\bar{u}_s = |u_\alpha^s, u_\beta^s|^t$  через параметри зовнішнього кола двигуна і змінні стану, за які приймаються струми статора  $\bar{i}_s = |i_\alpha^s, i_\beta^s|^t$  та потокозчеп-

лення ротора  $\bar{\psi}_r = |\psi_\alpha^r, \psi_\beta^r|^t$ . Опираючись на рівняння Кірхгофа та відомі співвідношення між електромагнітними змінними в ортогональній системі координат  $\alpha, \beta, 0$  і в природній системі координат  $A, B, C$ ,

можливо визначити, що в загальному випадку вектор напруг статора для досліджуваних схем (Штейнметца і послідовно-паралельної) є функцією напруги мережі  $u$ , вектора струму статора  $\bar{i}_s$ , вектора потокозчеп-

лень ротора  $\bar{\psi}_r$  і напруги на конденсаторі  $u_C$ , яка в свою чергу може бути визначена через складові вектора  $\bar{i}_s$ . Тоді загальний вираз для визначення вектора напруг статора буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{u}_s &= k_1 u + \frac{1}{C_1} k_2 \frac{1}{D} \bar{i}_s + L_m \left( \frac{L_m}{L_r} - 1 \right) k_3 D \bar{i}_s + \\ &+ \frac{L_m}{L_r} k_4 D \bar{\psi}_r. \end{aligned} \quad (2)$$

У правій частині виразу (2) перша складова обумовлена дією напруги мережі, друга – напругою на конденсаторі, третя – дією протиЕРС від струмів нульової послідовності, четверта – протиЕРС обертання.

Числові значення матриць коефіцієнтів  $\bar{k}_1 - \bar{k}_4$ , що дозволяють зв'язати вектор напруги статора двофазної моделі АД в координатах статора  $\alpha, \beta, 0$ , з параметрами зовнішнього кола двигуна (напруга мережі, ємність конденсатора) і змінними стану (вектори струму статора і потокозчеплення ротора) залежать від положення комутатора К і приведені в роботі [1].

Таким чином, зміна структури силового кола не вимагає зміни системи диференціальних рівнянь, а супроводжується тільки зміною коефіцієнтів  $\bar{k}_1 - \bar{k}_4$  в рівнянні (2).

Математичне моделювання динамічних процесів, що виникають внаслідок схемних перемикачів в трифазно-однофазних електроприводах з комбінованою схемою включення дозволило провести оптимізацію моменту перемикачів силових схем включення по критерію мінімального кидка струмів в комутуємих силових колах. Аналіз перехідних процесів, що відбуваються в таких електроприводах, показав, що максимальне миттєве значення струму в момент комутації в комбінованій схемі не перевищує п'ятикратного номінального. Тоді як при застосуванні пускового конденсатора короточасні стрибки струму можуть в десятки раз перевищувати його номінальне значення. В залежності від фазового кута  $\phi$  в момент комутації кратність максимального кидка струму до його номінального значення коливалась від 1,5 до 5. Отже вибором оптимального значення моменту комутації можливо значно зменшити максимальні кидки струму в колі статора та покращити експлуатаційні властивості електроприводу.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Шуруб Ю.В. Аналіз динамічних процесів в трифазно-однофазних асинхронних електроприводах із схемою комбінованого включення. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип.4/2005(33) – С. 33-35.

Надійшла 30.08.2006

## АНАЛИЗ МЫСЛЕННОГО ОПЫТА ЭЙНШТЕЙНА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОК В ФЕРРОМАГНИТНОМ ПРОВОДНИКЕ

Бранспиз Ю.А., д.т.н., проф.

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

Украина, 91034, Луганск, квартал Молодежный, 20-а, ВНУ им. В. Даля, кафедра прикладной физики

тел. (0642) 46-77-36, e-mail: branspiz@mail.ru

*Показано, що врахування товщини диска в уявному експерименті Ейнштейна не дозволяє зробити однозначний висновок про опис сили на електричний струм у магнітній речовині через напруженість або індукцію магнітного поля, оскільки істотним при цьому є спосіб опису сили магнітного поля на магнітну речовину.*

*Показано, что учет толщины диска в мысленном опыте Эйнштейна не позволяет сделать однозначный вывод об описании силы на электрический ток в магнитном веществе через напряженность или индукцию магнитного поля, поскольку существенным при этом является способ описания силы магнитного поля на магнитное вещество.*

В статье анализируется описанный Эйнштейном в [1] мысленный опыт, на основании которого им сделан вывод о том, что силовое воздействие на электрический ток в проводнике из вещества с магнитными свойствами должно описываться не объемной плотностью силы в традиционной форме записи вида

$$\vec{j} \times \vec{B}, \quad (1)$$

а объемной плотностью силы вида

$$\mu_0 \cdot \vec{j} \times \vec{H}, \quad (2)$$

где  $\vec{j}$  – вектор объемной плотности электрического тока,  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  – соответственно, векторы индукции и напряженности магнитного поля в магнитном веществе проводника.

В этом мысленном опыте Эйнштейн рассматривает систему, изображенную на рис. 1, представляющую собой некоторый "... металлический диск, по которому от центра к краю течет ток ...", поддерживаемый батареей [1]. При этом для рассматриваемой системы принимается следующее [1]:

- "... в силу принципа равенства действия и противодействия ... результирующая всех электромеханических сил, действующих на различные части системы, равна нулю...";

- "... равенство нулю этой результирующей должно выполняться и в том частном случае, когда диск сделан из немагнитного вещества...".

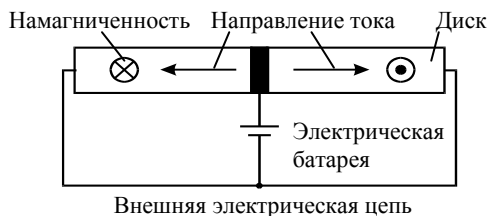


Рис. 1. Схема мысленного опыта Эйнштейна

В последнем случае (когда диск сделан из немагнитного вещества) равная нулю суммарная сила на все части системы складывается из (отметим, Эйнштейн такого разделения суммарной силы не делает): силы магнитного поля тока в диске на токи вне

диска; силы магнитного поля токов вне диска на токи в диске. Причем, очевидно, что суммарная сила магнитного поля токов в диске на сами эти токи равна нулю, как равна нулю и суммарная сила магнитного поля токов вне диска на сами эти внешние токи (отметим, что на это в [1] также не указывается).

Далее Эйнштейн рассматривает случай, "... когда диск сделан из какого-нибудь твердого материала, например, из стали ...", представляя собой "... постоянный магнит, причем его силовые линии являются окружностями с центром в центре диска" (рис. 1). Причем магнитный диск, намагниченный так, как это принято в рассматриваемом мысленном опыте создает магнитное поле с нулевой напряженностью как вне, так и внутри диска [1].

Произойдут ли изменения в силовых взаимодействиях в системе в этом случае? Эйнштейн считал, что выполнение диска из магнитного твердого материала не изменит силовых взаимодействий ни в целом, ни в частях. В самом деле, как объясняется в [1]:

- "... в силу принципа равенства действия и противодействия, каково бы ни было вещество, из которого изготовлен диск, результирующая всех электродинамических сил, действующая на различные части системы, равна нулю";

- намагниченность диска "... не может приводить к появлению соответствующей дополнительной пондеромоторной силы, ибо если бы эта сила была единственной появляющейся пондеромоторной силой, то для рассматриваемой системы оказался бы нарушенным закон равенства действия и противодействия".

Но это объяснение не является достаточным. В самом деле:

- поскольку вне магнитного диска магнитное поле отсутствует, то силовое воздействие со стороны диска на внешний ток будет определяться лишь магнитным полем тока в диске, как и для случая немагнитного диска;

- поэтому, и в самом деле, намагниченность диска не изменит силы на внешний ток, а, следовательно, тем самым неизменной будет и сила со стороны внешнего тока на намагниченный диск с током;

- но эта сила внешнего тока на намагниченный диск с током складывается из силы на собственно ток в диске и на намагниченное вещество;

- тогда, неизменность силы внешнего тока на намагниченный диск с током (в сравнении со случаем немагнитного диска), дает нулевую силу на магнитное вещество диска со стороны магнитного поля внешнего тока.

Однако, кроме указанных сил между диском с током и внешним током, в системе имеют место силы взаимодействия внутри магнитного диска, вызванные током в нем и его намагниченностью. Конечно, эти внутренние силы взаимно уравниваются (действие магнитного поля тока диска на его вещество уравнивается действием поля магнитного вещества диска на токи в нем). Но именно недоучет этих внутренних сил, как представляется, и привел Эйнштейна к выводу о том, что сила на ток в магнитном диске должна описываться плотностью силы вида  $\mu_0 \cdot \vec{j} \times \vec{H}$  (так в СИ, у Эйнштейна просто  $\vec{j} \times \vec{H}$ ).

Итак, считая, что сила, испытываемая магнитным веществом диска равно нулю, Эйнштейн делает вывод о том, что и магнитное вещество диска не оказывает силового воздействия на внешние и внутренние токи. Как следствие он и заключает, что:

- внутри магнитного диска индукция магнитного поля от намагниченности его не равна нулю (напряженность  $\vec{H}_m$  от этой намагниченности равна нулю, а индукция в диске от намагниченности равна  $\vec{B}_m = \mu_0 \cdot \vec{M}$ , где  $\vec{M}$  – намагниченность диска);

- такому отсутствию силового воздействия магнитного вещества диска на токи в нем соответствует именно выражение вида  $\mu_0 \cdot \vec{j} \times \vec{H}$ .

Выше указано на то, что магнитное поле внешнего тока на намагниченный диск с током дает нулевую силу на магнитное вещество диска со стороны магнитного поля внешнего тока. Что же касается силового воздействия на намагниченное вещество диска со стороны тока в нем, то принятие его равным нулю (на чем, собственно, и строятся рассуждения Эйнштейна) не является очевидным.

В этой связи отметим, что магнитное поле тока в диске не будет оказывать силового воздействия на намагниченное вещество диска лишь тогда, когда это поле будет нулевым. А таким оно является (с учетом симметрии системы и закона полного тока) лишь в горизонтальной плоскости симметрии диска. То есть, если учитывать толщину диска, то магнитное поле от тока в нем нельзя считать нулевым. Поэтому, с учетом того, что магнитное поле тока в диске в самом этом диске не нулевое, нельзя и утверждать, что это поле не оказывает какого-то силового действия на намагниченное вещество диска. При этом описание такого силового воздействия, очевидно, зависит от того, в какой форме записи представить объемную плотность пондеромоторной силы магнитного поля на магнитное вещество. Соответственно с этим (учет толщины диска и способа описания пондеромоторной силы на его вещество) и надо анализировать рассматриваемый мысленный опыт Эйнштейна.

С этой целью рассмотрим не диск, а бесконечную в плоскости  $(x, y)$  пластину с намагниченностью по оси  $y$ -ов, как это показано на рис. 2, на котором также показано направление тока в пластине (соответственно системе, рассмотренной Эйнштейном). Такой переход от диска к пластине, как несложно видеть, принципиально не изменяет ничего в физической сути соответствующих процессов, но существенно упрощает анализ.

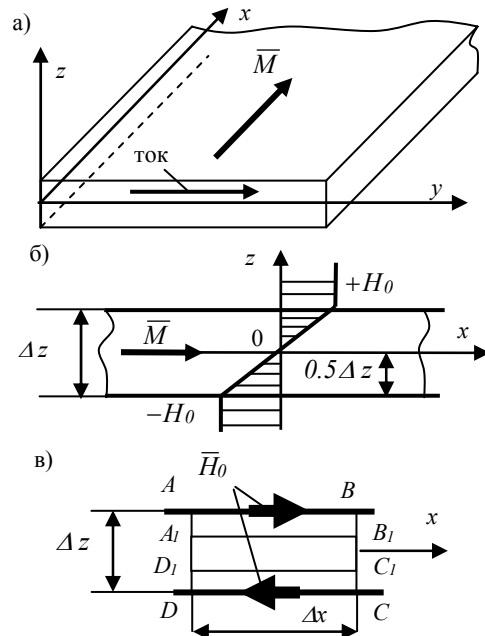


Рис. 2. Плоскопараллельный аналог мысленного опыта Эйнштейна

Применительно к магнитному веществу пластины под напряженностью  $\vec{H}$  следует понимать, согласно изложенному, напряженность магнитного поля тока в пластине. Эта напряженность, в силу симметрии рассматриваемой системы может быть легко выведена из закона полного тока, что дает для нее направленность по оси  $x$ -ов (рис. 2) и линейное распределение от некоторого значения  $-H_0$  до значения  $+H_0$ , соответственно на нижней и верхней стороне пластины. В самом деле, обозначим плотность тока в пластине  $\vec{j}_y$  (нижний индекс указывает направленность вектора плотности по оси  $y$ -ов, рис. 2,а). Далее, применим закон полного тока к контуру  $ABCD$  (рис. 2,в), учитывая при этом, что рассматриваемая напряженность имеет только  $x$ -овую составляющую (в силу симметрии). В результате можно записать равенство  $2 \cdot H_0 \cdot \Delta x = j_y \cdot \Delta x \cdot \Delta z$ , из которого для напряженности  $H_0$  несложно получить следующее выражение  $H_0 = 0.5 \cdot j_y \cdot \Delta z$ . Аналогично этому, применив закон полного тока к любому контуру  $A_1B_1C_1D_1$  (рис. 2,в), для напряженности поля в пластине (при учете пропорциональности напряженности высоте контура интегрирования) можно записать выражение (здесь  $z$  – вертикальная координата, рис. 2)

$$H_x = j_y \cdot z. \quad (3)$$

Тогда, если принять, например, что объемная плотность пондеромоторной силы магнитного поля на магнитное вещество определяется известным выражением  $\mu_0 \cdot |\vec{M}| \text{grad} |\vec{H}|$  [3], то в этом случае градиент модуля напряженности магнитного поля, действующего на магнитное вещество пластины определится, согласно (3), следующим равенством (здесь  $\vec{1}_z$  – единичный вектор по оси  $z$ , рис. 2)

$$\text{grad} |\vec{H}| = \text{grad} H_x = \text{grad} (j_y \cdot z) = j_y \cdot \vec{1}_z,$$

что, с учетом постоянства намагниченности ( $\vec{M} = M_y \cdot \vec{1}_y = \text{const}$ , здесь  $\vec{1}_y$  – единичный вектор по оси  $y$ ), дает для силы на выделенную часть пластины выражение

$$F_V = \mu_0 \cdot |\vec{M}| \text{grad} |\vec{H}| \cdot V = \mu_0 \cdot M_x \cdot j_y \cdot V \cdot \vec{1}_z. \quad (4)$$

Причем очевидно, что, согласно равенству действия и противодействия, эта сила должна быть равна по модулю силе, со стороны магнитного поля вещества пластины на ток в ней. Но, ведь напряженность магнитного поля намагниченной пластины равна нулю. Это следует из закона полного тока, примененного непосредственно к любому лежащему в плоскости ( $x, z$ ) симметричному контуру внутри пластины, горизонтальные ребра которого направлены по вектору  $\vec{M}$  (в силу симметрии рассматриваемой системы, если у указанной напряженности и есть составляющая, то она направлена именно по оси  $y$ -ов). То есть, с учетом связи векторов магнитного поля, в рассматриваемом случае индукция магнитного поля от намагниченного вещества пластины равна

$$\vec{B}_m = \mu_0 \cdot \vec{M}.$$

Следовательно, сила на ток в пластине, дающая в сумме с силой по (4) ноль, должна определяться в этом случае (описания силы на магнитное вещество выражением  $\mu_0 \cdot |\vec{M}| \text{grad} |\vec{H}|$ ) произведением плотности тока на *индукцию магнитного поля*.

Примем теперь, что плотность пондеромоторной силы магнитного поля на магнитное вещество определяется, например, другим также известным выражением  $\mu_0 \cdot (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H}$  [3], которое для рассматриваемого плоскопараллельного аналога м мысленного опыта Эйнштейна (рис. 2) может быть представлено в виде (здесь  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля, созданного в магнитной пластине током пластины)

$$\mu_0 \cdot (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H} = \mu_0 \cdot M_x \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial x}.$$

Тогда, с учетом (3), в этом случае для силы со стороны магнитного поля тока пластины на намагниченное вещество пластины имеем тождественный ноль. При этом для того, чтобы удовлетворить закону о равенстве действия и противодействия, сила со стороны магнитного поля намагниченного вещества пластины на ток в ней также должна быть принятой равной нулю. Последнее означает, что сила на ток в пластине должна определяться, в случае принятия выра-

жения  $\mu_0 \cdot (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H}$ , уже произведением плотности тока на *напряженность магнитного поля*.

То есть, рассуждения Эйнштейна действительны при описании силы магнитного поля на магнитное вещество выражением  $\mu_0 \cdot (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H}$ , которое как раз и обосновывается Эйнштейном (совместно с Лаубом) в более ранней работе [2], и, наверное, неявно принималось им в [1].

В качестве еще одного примера, примем, что удельная пондеромоторная сила магнитного поля определяется выражением  $-\mu_0 \cdot \vec{H} \cdot \text{div} \vec{M}$  [3], также достаточно известным. Использование этого выражения позволяет выразить суммарную силу магнитного поля токов в пластине на магнитное вещество пластины как объемный интеграл по объему пластины от выражения  $-\mu_0 \cdot H_x \cdot \text{div} \vec{M} \cdot \vec{1}_x$ , которое, учитывая условие  $\vec{M} = M_y \cdot \vec{1}_y = \text{const}$ , равно нулю во всех точках объема пластины, кроме точек разрыва векторов поля на плоскостях пластины. Последнее дает возможность свести указанное объемное интегрирование к поверхностному интегрированию для выражения  $H_0 \cdot (\vec{n} \cdot \vec{M}) \cdot \vec{1}_x$  (по нижней и верхней плоскости пластины, единичная нормаль к которым обозначена  $\vec{n}$ ). Но поскольку нормали к нижней и верхней поверхностям пластины ортогональны вектору  $\vec{M}$ , то имеем равенство  $(\vec{n} \cdot \vec{M}) = 0$  во всех точках нижней и верхней плоскостях пластины. Как следствие имеем нулевой результат для указанного поверхностного интегрирования. Таким образом, при использовании выражения  $-\mu_0 \cdot \vec{H} \cdot \text{div} \vec{M}$  для рассматриваемой пластины имеем нулевую силу на ее магнитное вещество. Это, исходя из равенства действия и противодействия, означает, что сила со стороны магнитного поля намагниченного вещества пластины на ток в ней должна быть принята в данном случае равной нулю. Это же означает, что сила на ток в пластине в данном случае должна определяться произведением плотности тока на *напряженность магнитного поля*.

Изложенное показывает, что результат рассматриваемого мысленного опыта Эйнштейна не позволяет сделать однозначного вывода об описании силы на электрический ток в магнитном веществе тем или иным способом ( $\vec{j} \times \vec{B}$  или  $\mu_0 \cdot \vec{j} \times \vec{H}$ ), который зависит от способа описания силы магнитного поля на магнитное вещество.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Эйнштейн А. О пондеромоторных силах, действующих на ферромагнитные проводники с током, помещенные в магнитное поле: В кн. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. В 4-х т. Т. 3.– М.: Наука, 1966. – С. 240-241.
- [2] Эйнштейн А., Лауб И. О пондеромоторных силах действующих в магнитном поле на покоящиеся тела: В кн. Эйнштейн А. Собр. науч. тр.: В 3-х т. Т.1.– М.: Наука, 1965. – С. 126-134.
- [3] Тамм И.Е. Основы теории электричества.– М.: Наука, 1989. – 504 с.

Поступила 30.08.2006

## ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕГАРМОНИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УПРАВЛЯЕМЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ И СИСТЕМАХ

Горбачев М.Н., к.т.н.  
Институт электродинамики НАН Украины  
Украина, 03057, Киев, пр. Победы, 56  
тел. (044) 454-25-64.

*Викладено та обґрунтовано принцип геометричного моделювання періодичних негармонічних енергетичних процесів у керованих електричних та радіотехнічних ланцюгах та системах електроживлення радіотехнічних пристроїв з використанням математичної теорії поля*

*Изложен и обоснован принцип геометрического моделирования периодических негармонических энергетических процессов в управляемых электрических и радиотехнических цепях и системах электропитания радиотехнических устройств с использованием математической теории поля*

### ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование негармонических периодических энергетических процессов в радиотехнических и электрических цепях и устройствах (например, во вторичных системах электропитания радиотехнических устройств систем электросвязи) является актуальной и современной научной проблемой, тесно связанной с решением ряда теоретических и прикладных задач. Интерес к изучению этой актуальной проблемы весьма велик, поскольку полная мощность, ее составляющие и взаимосвязи между ними являются важными характеристиками энергетических процессов, определяющими распределение электрической энергии в различных режимах работы указанных цепей и устройств.

Традиционный подход, в котором используются одномерные математические модели для решения указанных задач, изложен, например, в работах [1-11], имеет ряд недостатков, главный из которых заключается в том, что невозможно создать (построить) математическую модель указанного энергетического процесса как единого целого. Это связано с тем, что одномерные модели отображают не весь электрофизический процесс, а лишь отдельные его стороны. Для решения задач создания обобщенных математических моделей целесообразно использовать нетрадиционный научный подход, в основе которого лежит идея многомерного и, в частности, трехмерного пространственного моделирования указанных процессов, реализуемая на основе геометрических представлений и изложенная в работе [12, 16-29].

Однако в указанных выше работах не рассмотрены примеры применения математической теории поля при использовании трехмерных геометрических моделей конкретных объектов.

Целью настоящей статьи является математическое обоснование существования и нахождения обобщенных трехмерных геометрических моделей негармонических периодических (квазиустановившихся) энергетических процессов во входных цепях управляемых выпрямителей переменного тока при активной нагрузке, которые широко применяются на практике в источниках вторичного электропитания

радиотехнических устройств и систем электросвязи (на примере симметричной трехфазной мостовой схемы [2, 3]) с использованием математической теории поля [14, 15].

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕГАРМОНИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УПРАВЛЯЕМЫХ ЦЕПЯХ

Определение мощности искажения  $T$  как мощности невязки между полной мощностью  $S = f(P, Q, T)$  и ее активной  $P$  и реактивной  $Q$  составляющими, определяемыми первыми гармониками потребляемого из сети тока и напряжения сети, дает основание геометрически представить полную мощность как трехмерный вектор  $\vec{S}(P, Q, T)$  в евклидовой системе координат, а именно:

$$\vec{S} = P\vec{i} + Q\vec{j} + T\vec{k}.$$

При этом мощности  $P$ ,  $Q$  и  $T$  имеют смысл ортогональных составляющих вектора  $\vec{S}$  по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  и их значения связаны с модулем вектора  $S = |\vec{S}|$  известным соотношением, выражающим квадрат модуля (длины) вектора  $\vec{S}$  [2-11]:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + T^2.$$

Разделив каждое из уравнений, определяющее ортогональные составляющие  $P$ ,  $Q$  и  $T$  на величину модуля вектора  $\vec{S}$ , приходим к системе уравнений в относительных величинах  $\tilde{P}$ ,  $\tilde{Q}$  и  $\tilde{T}$ , причем  $\tilde{S} = 1$ :

$$\begin{cases} \tilde{P} = v \cdot \cos \varphi_1, \\ \tilde{Q} = v \cdot \sin \varphi_1, \\ \tilde{T} = \sqrt{1 - v^2}. \end{cases} \quad (1)$$

Систему уравнений (1) можно рассматривать как систему, задающую координаты точек некоторой поверхности в трехмерном Евклидовом пространстве в функции двух параметров ( $\varphi_1$  и  $v$ ). Возьмем в качестве

параметров, характеризующих положение произвольной точки  $M(x, y, z)$  на искомой поверхности, угол  $\varphi_1$  и угол  $\psi$ , сделав при этом замены переменных:

$$\begin{aligned} x &= \tilde{P}(\varphi_1, \psi), & y &= \tilde{Q}(\varphi_1, \psi), & z &= \tilde{T}(\psi), \\ & & & & \psi &= \arcsin v. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда систему уравнений (1) удобно представить в параметрической форме

$$\begin{cases} x = \sin \psi \cdot \cos \varphi_1, \\ y = \sin \psi \cdot \sin \varphi_1, \\ z = \cos \psi, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\sin \psi = v$  и  $\psi$  – угол, который образует радиус-вектор точки  $M(x, y, z)$  с осью  $OZ$ .

Система (3) представляет собой уравнение сферы в параметрической форме с радиусом  $R = 1$ , которому соответствует уравнение в канонической форме [13]:

$$x^2 + y^2 + z^2 - 1 = 0. \quad (4)$$

В конкретных частных случаях, соответствующих вентильным преобразователям, угол  $\varphi_1$  изменяется в пределах  $0 \leq \varphi_1 \leq \pi/2$  при работе управляемого выпрямителя (УВ) в режиме выпрямления и в пределах  $\pi/2 \leq \varphi_1 \leq \pi$  в режиме инвертирования, то есть когда УВ переходит в режим ведомого сетью инвертора [2-4]. Таким образом, при одновременном изменении в указанных пределах величин  $\varphi_1$  и  $v$  и, следовательно, угла  $\psi$  системы уравнений (1) и (3) определяют часть поверхности сферы в трехмерном Евклидовом пространстве. Это означает, что рассматриваемые рабочие режимы, характеризуемые двумя переменными скалярными величинами – углом регулирования  $\alpha$  и углом коммутации  $\gamma$ , связанным с переменным параметром  $v$ , отображаются с помощью системы уравнений (3) в трехмерном Евклидовом пространстве на части поверхности сферического (шарового) пояса.

Из геометрического подхода вытекает важное следствие, состоящее в том, что обобщенной количественной мерой  $\sigma$ , характеризующей совокупности (множества) энергетических квазистационарных процессов электропотребления со стороны входных цепей УВ, можно считать площади указанных областей как геометрического образа на соответствующем шаровом (сферическом) поясе. Эти площади  $\sigma$  можно рассчитать с помощью двойного интеграла [14, 15]:

$$\sigma = \iint_{(\sigma)} d\sigma = \iint_{(\sigma)} \frac{d\delta_{xy}}{|\cos(n, z)|}, \quad (5)$$

где  $\cos(n, z)$  – направляющий косинус нормали  $\vec{n}$  к поверхности  $\sigma$  в произвольной точке  $M$ ;  $d\delta_{xy}$  – проекция по плоскости  $XOY$  элемента площади криволинейной поверхности.

На основании формулы (5) получена следующая расчетная формула для сферы радиуса  $R$ :

$$\sigma = R^2 (\varphi_{1max} - \varphi_{1min}) \cdot (\cos \psi_1 - \cos \psi_2). \quad (6)$$

Используя геометрический подход и математическую теорию поля (в данном случае – это поле рас-

четных параметров) определяем поток  $\Phi$  вектора полной мощности  $\vec{S}$  через отображающую сферическую поверхность  $\sigma$ , соответствующую множеству (совокупности) энергетических процессов и рабочих режимов в рассматриваемых преобразовательных цепях с управляемыми элементами с учетом заданных диапазонов изменения угловых параметров  $\varphi$  и  $\psi$ , с помощью двойного интеграла [14, 15]:

$$\Phi = \iint_{(\sigma)} \vec{S} d\vec{\sigma} = \iint S_n d\sigma, \quad (7)$$

где  $S_n$  – проекция вектора  $\vec{S}$  на нормаль  $\vec{n}$  к поверхности в произвольной точке  $M(x, y, z)$ .

Интегрирование выражения (7) с учетом [14, 15] для сферы постоянного радиуса ( $\rho = R = S$ ) приводит к следующему результату

$$\begin{aligned} \Phi &= \iint_{(\sigma)} S d\sigma = S \int d\varphi \int_{\psi_1}^{\psi_2} \rho^2 \sin \psi d\psi = \\ &= S^3 (\varphi_{max} - \varphi_{min}) (\cos \psi_1 - \cos \psi_2) \frac{\text{единиц}}{\text{потока}}. \end{aligned} \quad (8)$$

В целом теория геометрического моделирования периодических негармонических энергетических процессов в управляемых радиотехнических и электрических цепях и системах получила дальнейшее развитие в данной статье, а также в работах [22, 30, 31].

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе дано, во-первых, математическое обоснование принципа геометрического моделирования периодических негармонических (квазиустановившихся) энергетических процессов в электрических цепях и системах электропитания.

Во-вторых, дано геометрическое представление полной мощности как вектора в трехмерном Евклидовом пространстве позволило применить математическую теорию поля для исследования периодических негармонических энергетических процессов в электрических цепях с управляемыми элементами и установить связи между теорией цепей и теорией поля.

Действительно, в работе доказано, что поток вектора полной мощности  $\vec{S}$  через отображающую поверхность  $\sigma$ , представляющую собой часть шарового (сферического) пояса, а также площадь этой поверхности  $\sigma$  являются интегральными расчетными характеристиками, которые можно использовать для оценки и сопоставления (сравнительного анализа) периодических негармонических (квазиустановившихся) энергетических процессов и рабочих режимов в управляемых электрических цепях и системах (например, во вторичных источниках электропитания).

Расчетные формулы, полученные на основе применения математической теории поля, являются соотношениями, установившими связи между параметрами цепей УВ и расчетными характеристиками векторного поля, порождаемого вектором полной мощностью в соответствии с принципом геометрического моделирования [12, 16, 21, 23, 24, 26, 27, 29, 30-32].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. – Л.: Энергия. – 1967. – Т.1. – Ч. 2. – 522 с.
- [2] Полупроводниковые выпрямители/Под ред. Ф.И. Ковалева и Г.П. Мостковой. – М.: Энергия, 1967. – 480 с.
- [3] Китаев В. Е. Электротехнические устройства радиосистем. – М.: Энергия – 1971.–344с.
- [4] Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – Киев: Вища школа – 1978.– 424 с.
- [5] Пухов Г.Е. Теория мощности системы периодических многофазных токов. – Электричество. – 1953 – № 2. – С. 56-61.
- [6] Лурье Л.С. Кажущаяся мощность трехфазной системы. – Электричество. – 1951. – № 1. – С. 47-53.
- [7] Новомейски З. Мощность активная, реактивная и мощность искажения в электрических системах с периодическими несинусоидальными токами. – Изв. вузов Электромеханика. – 1964. – № 6. – С. 657-664.
- [8] Мосткова Г.П., Родина З.С. Составляющие полной мощности в цепях с вентилями. – Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. – 1975. – Вып. 4(63). – С. 21-25.
- [9] Горбачев Г. Н., Чаплыгин Е. Е. Промышленная электроника. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 320 с.
- [10] Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 440 с.
- [11] Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы электротехники. – М.-Л.: Госэнергоиздат. – Ч. 2. – 1955. – 216 с.
- [12] Горбачев М.Н. Геометрическое моделирование физических процессов в электрических цепях и системах с управляемыми элементами.– Труды IV Международ. науч. конф. "Геометрия и топология" – Черкассы: Черкасский Технологический институт.–2001. – С. 71-73.
- [13] Погорелов А.В. Лекции по аналитической геометрии. – Харьков: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1963. – 182 с.
- [14] Смирнов В.И. Курс высшей математики. – М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., том 2. – 1956. – 628 с.
- [15] Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. – Л.-: Гл. ред. техн.-теор. лит., 1937. – 456 с.
- [16] Горбачев М.Н. Геометрическое моделирование режимов работы систем электропитания на основе вентильных преобразователей // Автоматизация и релейная защита в энергосистемах'98. – Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1998. – С. 146-149.
- [17] M.Gorbachev. Analysis of systems of electrical supply with special characteristics on the basis of regulated rectifiers // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL SCIENTIFIC and TECHNICAL CONFERENCE on UNCONVENTIONAL ELECTROMECHANICAL AND ELECTROTECHNICAL SYSTEMS (15-17 December 1996, Poland). – SZCZECIN: TECHNICAL UNIVERSITY PRESS, 1996. – Vol. 3. – P. 725-730.
- [18] Горбачев М.Н. Особенности расчета мощности реактивных элементов компенсированного управляемого мостового выпрямителя как источника тока // Техн. электродинамика. – 1996. – № 2. – С. 39-45.
- [19] Горбачев М.Н. Геометрическое моделирование энергетических процессов в электрических управляемых цепях с нелинейными элементами. Праці Інституту електродинаміки НАН України. Енергоефективність: Зб. наук. пр. – Київ, ІЕД НАН України, 2001. – С. 53-56.
- [20] Горбачев М.Н. Анализ режимов работы систем электропитания на основе вентильных преобразователей методом параметризации ортогональных составляющих полной мощности. – Вісник Націон. техн. ун-ту "ХПІ". – Вып. 16. – 2001. – С. 53-55.
- [21] M.N.Gorbachov. Geometric Simulation of Quasistationary Power Processes in Electric Circuits with Controlled Semiconductor Elements. – Engineering Simulation, 2000, Vol. 17, pp. 463-474.
- [22] Горбачев М.Н. Новый подход к исследованию энергетических процессов в управляемых электрических цепях. – Вестник Харьковск. госуд. политехн. ун-та "ХПИ". Вып. 113., 2000. – С. 133-134.
- [23] Горбачев М.Н. Анализ энергетики систем электропитания на основе управляемых вентильных преобразователей. – "Радиоэлектроника. Информатика. Управление". – 2000. – № 2. – С. 40-45.
- [24] Горбачев М.Н. Теория геометрического моделирования электроэнергетических процессов в электрических цепях и системах с управляемыми элементами. – Труды 4-ой Международ. науч.-практич. конф. "Системы и средства передачи и обработки информации". – Одесса: УГАС им. А.С. Попова, 2000. – С. 57-58.
- [25] Горбачев М.Н. Анализ режимов систем электропитания на основе управляемых вентильных преобразователей. – Електротехніка та електроенергетика. – 1999. – № 1. – С. 26-28.
- [26] Горбачев М.Н. Геометрические модели управляемых вентильных преобразователей. – Вестник Харьковск. госуд. политехн. ун-та "ХПИ". Вып. 61.- 1999. – С. 288-289.
- [27] Горбачев М.Н. Геометрическое моделирование энергетических процессов в электрических преобразовательных цепях и системах. – Технічна електродинаміка. Спец. вип. 2. – Том 2. – 1998. – С. 89-94.
- [28] Горбачев М.Н. Система обобщенных уравнений управляемого мостового выпрямителя // Техн. электродинамика. – 1997. – № 4. – С. 29-35.
- [29] M. Gorbachev. Geometrical modeling of energetical processes in the regulated rectifiers // Proceedings of the 3 International Scientific and Technical Conference on "Unconventional Electromechanical and Electrical Systems" (19-21 September 1997, Alushta, The Crimea, Ukraine). – Technical University Press, Szczecin, 1997. – Vol. 2. – P. 575-580.
- [30] Горбачев М.Н., Чернай В.Ф. Новый подход к анализу энергетических процессов во вторичных системах электропитания со стабилизирующей выходных параметров. – Тр. V Международ. науч.-техн. конф. "Системы и средства передачи и обработки информации" (г. Одесса). – Одесса: Изд. Центр ОНАС. 2001 г., – С. 63-64.
- [31] Горбачев М.Н. Анализ режимов работы систем электропитания на основе вентильных преобразователей методом параметризации ортогональных составляющих полной мощности. – Вісник Націон. ун-ту "ХПІ". – Вып. 16. – 2001. – С. 53-55.
- [32] Горбачев М.Н. Математическое моделирование электроэнергетических процессов и режимов работы силовых преобразовательных устройств с управляемыми электронными приборами на основе геометрических представлений / Сб. тр. VI Международ. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-2002. – Т. 6. – Новосибирск: Новосибирск. госуд. техн. ун-т. – С. 186-190.

*Поступила 30.08.2006*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ПОМЕЩЕНИЯХ

Пелевин Д.Е.

Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины  
Украина, 61106, Харьков, 106, ул. Индустриальная, 19  
тел./факс +38(0572) 99-21-62, e-mail: magnetizm@kharkov.com

*Розроблено метод визначення первинних даних для електромагнітних пристроїв керування магнітним полем у приміщеннях, заснований на прямих вимірюваннях напруженості магнітного поля у заданому об'ємі приміщення у вузлах просторової сітки. Для обробки первинного масиву даних використовується метод інтерполяції кубічною сплайн-функцією, а первинні дані наводяться кількісно – у вигляді матриць та графічно – у вигляді карт розподілу магнітного поля на паралельних та ортогональних площинах.*

*Разработан метод определения исходных данных для электромагнитных устройств управления магнитным полем в помещениях, основанный на прямых измерениях напряженности магнитного поля в заданном объеме помещения в узлах пространственной сетки. Для обработки первичного массива данных используется метод интерполяции кубической сплайн-функцией, а исходные данные представляются количественно – в виде матриц и графически – в виде карт распределения магнитного поля на параллельных и ортогональных плоскостях.*

### ВВЕДЕНИЕ

В основу технологии выбора параметров электромагнитных устройств управления магнитным полем положено, во-первых, знание исходных (до установки устройства) данных об искажениях напряженности геомагнитного поля в заданном локальном объеме  $V$  помещения и, во-вторых, - требуемая эффективность снижения этих искажений [1].

Цель работы – разработка методики определения исходных данных для электромагнитных устройств управления магнитным полем в заданном объеме помещения.

В малых объемах (единицы  $\text{дм}^3$ ), именуемыми в дальнейшем микрообъемами, в качестве характеристики искажений геомагнитного поля используют чаще всего такой показатель, как отклонение индукции геомагнитного поля в геометрическом центре микрообъема.

Малые размеры объема позволяют свести задание искажений геомагнитного поля в заданном объеме к знанию разности между реальными значениями компонент напряженности  $H_{xj}^0$ ,  $H_{yj}^0$  и  $H_{zj}^0$  магнитного поля в его геометрическом центре и значениями геомагнитного поля:

$$\begin{aligned} \Delta H_{xj}^0 &= H_{xj}^0 - H_x^{\text{МПЗ}}; \\ \Delta H_{yj}^0 &= H_{yj}^0 - H_y^{\text{МПЗ}}; \\ \Delta H_{zj}^0 &= H_{zj}^0 - H_z^{\text{МПЗ}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $H_{ij}^0$  - значение напряженности магнитного поля по  $i$ -тому направлению ( $i - x, y, z$ ) в  $j$ -той точке объема с координатами ( $j - x, y, z$ ). В данном случае  $j = x_0, y_0, z_0$ , т.е. речь идет о точке, совпадающей с геометрическим центром объема;  $H_i^{\text{МПЗ}}$  - текущее значение напряженности геомагнитного поля по  $i$ -тому направлению ( $i - x, y, z$ ). Значение этой напряженности определяется координатами расположения того или иного локального объема в географических координатах Земли;  $\Delta H_{ij}^0$  - значение напряженности искажений геомагнитного поля по  $i$ -тому направлению в  $j$ -той точке объема с координатами  $j = x_0, y_0, z_0$ .

Относительная погрешность  $\delta_{ij}^0$  такого пред-

ставления искажений геомагнитного поля по  $i$ -тому направлению в геометрическом центре объема будет определяться как:

$$\delta_{ij}^0 = \frac{\Delta H_{ij}^0 - \Delta H_i^{\text{МПЗ}}}{|H^{\text{МПЗ}}|}, \quad (2)$$

где  $|H^{\text{МПЗ}}|$  - модуль напряженности геомагнитного поля для данной широтной зоны.

Абсолютная погрешность  $\Delta_{ij}$  такого представления искажений геомагнитного поля в малых объемах определяется как разность между значением напряженности искажений в любой точке  $j$  с координатами  $x, y, z$ , принадлежащей микрообъему, и напряженностью искажений в геометрическом центре объема

$$\Delta_{ij} = \Delta H_{ij} - \Delta H_{ij}^0. \quad (3)$$

Из соотношения (3), а также из общих представлений о магнетизме технических объектов [2] абсолютно очевидно, что снижение погрешности  $\Delta_{ij}$  тесно увязано как с размерами микрообъема, так и удаленностью от него источников магнитного поля. По существу, величина погрешности  $\Delta_{ij}$  с уменьшением заданного объема будет снижаться, равно как и при удалении от него источников магнитного поля.

Именно наличие этих факторов и обеспечивают на практике крайне малые значения погрешности  $\Delta_{ij}$  применительно к малым объемам. В относительных единицах  $\delta_{ij} = \Delta_{ij} / H^{\text{МПЗ}}$  величина этой погрешности находится в пределах десятых долей процента.

Перечисленные выше особенности искажений геомагнитного поля в микрообъеме определяют и методический подход к построению электромагнитных устройств для их снижения. Так, для снижения искажений геомагнитного поля в локальном объеме малых размеров используются чаще всего электромагнитные устройства, в которых исполнительным органом (источником компенсирующего магнитного поля) являются системы колец Гельмгольца, Браунбека, Рубенса и т.д. Такие системы, создавая в упомянутом микрообъеме близкое к равномерному магнитное поле, позволяют снизить общий уровень его искажений до значений абсолютной погрешности  $\Delta_{ij}$ .

Для минимизации магнитного поля в микрообъ-



еме часто используются также и компенсирующие постоянные магниты или электромагниты [3]. Эти магниты устанавливаются вблизи микрообъема. При этом характеристики магнита (электромагнита) выбираются исходя из условий компенсации искажений геомагнитного поля в одной точке – геометрическом центре микрообъема:

$$\Delta H_{ij}^0 = H_{im}, \quad (4)$$

где  $H_{im}$  – напряженность магнитного поля в геометрическом центре микрообъема, которое создается одним или несколькими компенсирующими магнитами.

Данное представление искажений и геомагнитного поля является достаточным при решении ограниченного ряда технических задач. К ним в первую очередь относятся задачи по снижению искажений геомагнитного поля в месте установки компасов на судах, магнитометров в космических аппаратах и пр.

Однако такой подход является неприемлемым, когда дело касается представления искажений геомагнитного поля в макрообъемах (несколько кубических метров). Такая неприемлемость связана с существенным отличием в степени искажения  $\Delta_{ij}$  напряженности геомагнитного поля в различных точках макрообъема. Именно наличие этого фактора вносит свои особенности в оценку искажений геомагнитного поля в макрообъемах.

Упомянутая выше неравномерность  $\Delta_{ij}$  степени искажения напряженности геомагнитного поля в макрообъемах обусловлена как размерами этого объема, так и относительной близостью к нему источников магнитного поля. К таким источникам относятся ферромагнитные элементы конструкции здания (стен, потолка, пола), а также различные машины, механизмы и прочее оборудование расположенное вблизи локального макрообъема.

Из изложенного следует, что использование подходов, применяемых в отношении микрообъемов, является некорректным при решении задач снижения искажений геомагнитного поля. Сказанное справедливо и в отношении оценки уровня искажений геомагнитного поля применительно к макрообъемам.

Таким образом, для определения реального распределения искажений геомагнитного поля в макрообъемах и для создания методологии и выбора параметров электромагнитных устройств, адаптированных для снижения этих искажений требуется:

- способ измерения искажений геомагнитного поля;
- форма представления конечной информации о распределении магнитного поля в заданном объеме;
- методика пересчета магнитного поля в любую точку рабочего объема;

Знание перечисленных характеристик и методик их определения необходимо не только для проектирования и изготовления электромагнитных устройств, но и для их настройки и эксплуатации.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МАКРООБЪЕМЕ

Практическое определение искажений геомагнитного поля в макрообъеме основано на проведении прямых измерений напряженности геомагнитного поля в ограниченном числе точек объема. Для проведения таких измерений предлагается в заданном объеме определить пространственную сетку, в узлах которой должны быть измерены значения напряженно-

сти магнитного поля (рис. 1). Геометрические размеры пространственной сетки выбираются в зависимости от размера объема. Шаг сетки измерения  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  выбирается из ряда соображений. Это в первую очередь, погрешность описания искажения геомагнитного поля и удаленность макрообъема от источников магнитного поля. На величину шага сетки измерений оказывают влияние и возможности измерительной аппаратуры, здравый смысл и пр.

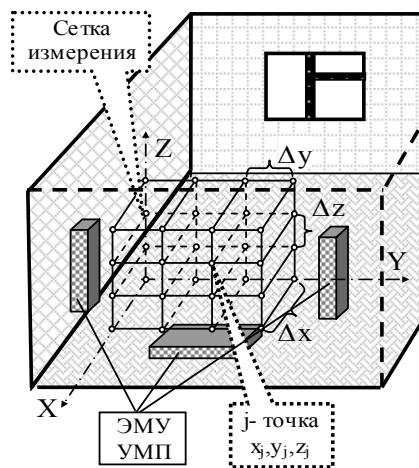


Рис. 1. Сетка измерения и электромагнитное устройство управления магнитным полем (ЭМУ УМП) в помещении

Методология определения искажений геомагнитного поля в заданном объеме основывается на прямых измерениях компонент напряженности  $H_{ij}$  магнитного поля в каждом из  $j$  узлов выбранной сетки по каждому  $i$ -тому направлению. Направления  $i$ , по которым проводится измерение компонент напряженности  $H_{xj}$ ,  $H_{yj}$ ,  $H_{zj}$  геомагнитного поля совпадают с осями сетки. Число узлов сетки определяется ее градацией по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Обозначим число градаций по указанным осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , соответственно равным  $K$ ,  $L$  и  $M$ . При этом каждый из узлов сетки будет определяться координатами  $x_k, y_l, z_m$ :

$$k=0, 1, \dots, K; \quad l=0, 1, \dots, L; \quad m=0, 1, \dots, M.$$

С учетом принятых обозначений, измеренное магнитометром значение напряженности магнитного поля в каждом из узлов сетки будет иметь представление  $H_{i(x_k, y_l, z_m)}$ .

Сама же величина искажений напряженности геомагнитного поля  $\Delta H_{i(x_k, y_l, z_m)}$  в любой из точек сетки будет определяться как разность между измеренной величиной магнитного поля  $H_{i(x_k, y_l, z_m)}$  и текущим значением напряженности геомагнитного поля Земли по  $i$ -тому направлению

$$\Delta H_{i(x_k, y_l, z_m)} = H_{i(x_k, y_l, z_m)} - H_i^{МПЗ}. \quad (5)$$

Величина напряженности  $H_i^{МПЗ}$ , как уже указывалось ранее, определяется расположением того или иного локального объема в географических координатах Земли.

Описаний подход к определению искажений геомагнитного поля может быть реализован в виде способа прямых измерений напряженности магнитного поля в каждом из узлов посредством магнитометра с одним трехкомпонентным датчиком. В этом случае трехкомпонентный датчик магнитометра располагают последовательно в каждый из узлов сетки (рис. 1). Оси магнитометра при этом ориентируют по выбран-

ным  $i$ -тым направлениям. Сама же относительная погрешность  $\delta_{ij}$  определения искажений геомагнитного поля в  $j$ -том узле сетки с координатами  $x_k, y_l, z_m$  по  $i$ -тому направлению при этом будет определяться как

$$\delta_{ij} = \left| \frac{H_{i(x_k, y_l, z_m)} - H_i^{МПЗ}}{H^{МПЗ}} \right|. \quad (6)$$

Предлагается весь массив погрешностей  $\delta_{ij}$ , определенных путем измерений, в каждом их узлов сетки, представлять в виде матриц сформированных для точек плоскостей (плоскость  $XY$ ) при значениях  $Z = 0, 1, \dots, m, \dots, M$ . С учетом такого представления матрица относительных погрешностей в плоскости  $XY$  при  $Z = m$  будет иметь вид:

$$\begin{pmatrix} \delta_i(x_0, y_0, z_m) & \dots & \delta_i(x_0, y_l, z_m) & \dots & \delta_i(x_0, y_L, z_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_i(x_k, y_0, z_m) & \dots & \delta_i(x_k, y_l, z_m) & \dots & \delta_i(x_k, y_L, z_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_i(x_K, y_0, z_m) & \dots & \delta_i(x_K, y_l, z_m) & \dots & \delta_i(x_K, y_L, z_m) \end{pmatrix}$$

Такие же матрицы можно получить посредством феррозондовых магнитометров с двумя датчиками – измерительным и компенсационным. Такие магнитометры освоены промышленностью и широко используются в геодезии.

В этом случае измерительный датчик устанавливается последовательно в узлы сетки, как и в случае с магнитометром с одним датчиком, а второй компенсационный датчик выносят за пределы локального объема и располагают в месте, где искажения геомагнитного поля отсутствуют (рис. 2).

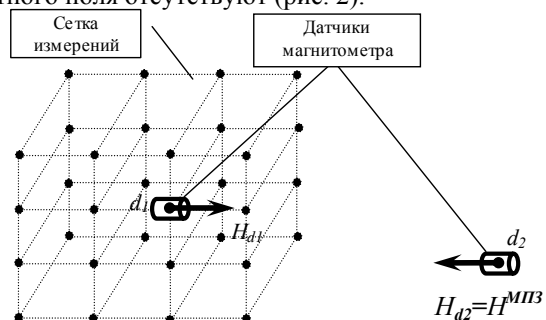


Рис. 2. Схема расположения датчиков магнитометра

При этом искажение геомагнитного поля в месте установки компенсационного датчика может быть обеспечено, как за счет удаленности датчика от источников магнитного поля, так и за счет использования различного рода компенсаторов для устранения искажения геомагнитного поля в микрообъемах.

В этом случае показания прибора будут непосредственно регистрировать абсолютную величину искажений  $\Delta H_{i(x_k, y_l, z_m)}$  геомагнитного поля в  $j$ -том узле сетки.

#### ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНОГО МАССИВА ДАННЫХ

Точки измерения располагаются в узлах пространственной сетки, образованной взаимно перпендикулярными сечениями плоскостей. Это позволяет сгруппировать их по сечениям и рассматривать далее распределение магнитного поля на плоскости. Полученное в результате измерений распределение напряженности магнитного поля на плоскости представляет собой дискретную функцию, значения которой иска-

жены "шумом" (случайными ошибками). Для определения значений функции в точках между узлами сетки измерения в математике используют методы интерполяции. Из всего многообразия существующих математических решений выбор наиболее приемлемого является сложной задачей. Для интерполяции напряженности магнитного поля в данной работе использован метод интерполяции кубической сплайн-функцией [4]. Это связано с тем, что этот метод обладает хорошими аппроксимативными свойствами, простотой реализации на вычислительной технике, мало чувствителен к случайным ошибкам и позволяет определять значение производной аппроксимируемой функции, знание которых необходимо для определения параметров электромагнитных устройств управления магнитным полем в помещениях [1].

Рассмотрим механизм реализации метода интерполяции для построения изодинам напряженности магнитного поля на плоскости  $XY$  при  $Z = m$ . Для области  $\Omega = [a, b] \times [c, d]$  в которой введена сетка  $\Delta = \Delta_x \times \Delta_y$ , где  $\Delta_x \in a = x_0 < \dots < x_k < \dots < x_K = b$ ,  $\Delta_y \in c = y_0 < \dots < y_l < \dots < y_L = d$ , а в узлах сетки  $(x_k, y_l)$  заданы значения напряженности магнитного поля  $H_{i(x_k, y_l, z_m)}$  кубическая сплайн-функция определяется по соотношению [5]. Далее для простоты записи  $z_m$  опущено. Тогда

$$S(x, y) = \varphi(t) \cdot F \cdot \varphi(u), \quad (7)$$

где  $\varphi(t) = [\varphi(t_1) \quad \varphi(t_2) \quad h_i \cdot \varphi(t_3) \quad h_i \cdot \varphi(t_4)]$ ;

$$F = \begin{bmatrix} H_{i(x_k, y_l)} & H_{i(x_k, y_{l+1})} & H_{i(x_k, y_l)}^{1,0} & H_{i(x_k, y_{l+1})}^{1,0} \\ H_{i(x_{k+1}, y_l)} & H_{i(x_{k+1}, y_{l+1})} & H_{i(x_{k+1}, y_l)}^{1,0} & H_{i(x_{k+1}, y_{l+1})}^{1,0} \\ H_{i(x_k, y_l)}^{0,1} & H_{i(x_k, y_{l+1})}^{0,1} & H_{i(x_k, y_l)}^{1,1} & H_{i(x_k, y_{l+1})}^{1,1} \\ H_{i(x_{k+1}, y_l)}^{0,1} & H_{i(x_{k+1}, y_{l+1})}^{0,1} & H_{i(x_{k+1}, y_l)}^{1,1} & H_{i(x_{k+1}, y_{l+1})}^{1,1} \end{bmatrix}$$

$$\varphi(u) = \begin{bmatrix} \varphi(u_1) \\ \varphi(u_2) \\ l_i \cdot \varphi(u_3) \\ l_i \cdot \varphi(u_4) \end{bmatrix};$$

$$\varphi(t_1) = (1-t)^2(1+2t); \quad \varphi(t_2) = t^2(3-2t); \quad \varphi(t_3) = t(1-t)^2;$$

$$\varphi(t_4) = -t^2(1-t); \quad \varphi(u_1) = (1-u)^2(1+2u);$$

$$\varphi(u_2) = u^2(3-2u); \quad \varphi(u_3) = u(1-u)^2;$$

$$\varphi(u_4) = -u^2(1-u); \quad h_k = x_{k+1} - x_k; \quad t = \frac{(x - x_k)}{h_k};$$

$$\tau_l = y_{l+1} - y_l; \quad u = \frac{(y - y_l)}{\tau_l};$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{1,0} = \frac{\partial}{\partial x} H_{i(x_k, y_l)},$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{0,1} = \frac{\partial}{\partial y} H_{i(x_k, y_l)},$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{1,1} = \frac{\partial}{\partial x \partial y} H_{i(x_k, y_l)}.$$

Для построения кубического сплайна (7) необходимо знать в узлах сетки  $\Delta$  значение измеряемой напряженности магнитного поля. Для определения производных напряженности магнитного поля применим приближенные формулы на основе разделенных разностей. Положим;

$$H_{i(x_k, y_l)}^{1,0} = \lambda_k \frac{H_{i(x_k, y_l)} - H_{i(x_{k-1}, y_l)}}{h_{k-1}} + \mu_k \frac{H_{i(x_{k+1}, y_l)} - H_{i(x_k, y_l)}}{h_k}, \quad (8)$$

где  $k = 1, \dots, K-1$ ;

$$H_{i(x_0, y_l)}^{1,0} = (1 + \mu_1) \frac{H_{i(x_1, y_l)} - H_{i(x_0, y_l)}}{h_0} - \mu_1 \frac{H_{i(x_2, y_l)} - H_{i(x_1, y_l)}}{h_1}, \quad (9)$$

$$H_{i(x_K, y_l)}^{1,0} = -\lambda_{K-1} \frac{H_{i(x_{K-1}, y_l)} - H_{i(x_{K-2}, y_l)}}{h_{K-2}} + (1 + \lambda_{K-1}) \frac{H_{i(x_K, y_l)} - H_{i(x_{K-1}, y_l)}}{h_{K-1}}, \quad (10)$$

$$\mu_k = h_{k-1} (h_k + h_{k-1})^{-1}, \quad \lambda_k = 1 - \mu_k;$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{0,1} = \alpha_l \frac{H_{i(x_k, y_l)} - H_{i(x_k, y_{l-1})}}{\tau_{l-1}} + \beta_l \frac{H_{i(x_k, y_{l+1})} - H_{i(x_k, y_l)}}{\tau_l}, \quad (11)$$

$l = 1, \dots, L-1$ ;

$$H_{i(x_k, y_0)}^{0,1} = (1 + \beta_1) \frac{H_{i(x_k, y_1)} - H_{i(x_k, y_0)}}{\tau_0} - \beta_1 \frac{H_{i(x_k, y_2)} - H_{i(x_k, y_1)}}{\tau_1}, \quad (12)$$

$$H_{i(x_k, y_L)}^{0,1} = -\alpha_{L-1} \frac{H_{i(x_k, y_{L-1})} - H_{i(x_k, y_{L-2})}}{\tau_{L-2}} + (1 + \alpha_{L-1}) \frac{H_{i(x_k, y_L)} - H_{i(x_k, y_{L-1})}}{\tau_{L-1}}, \quad (13)$$

$$\beta_l = \tau_{l-1} (\tau_l + \tau_{l-1})^{-1}; \quad \alpha_l = 1 - \beta_l;$$

$$H_{i(x_k, y_l)}^{1,1} = \lambda_k \frac{H_{i(x_k, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_{k-1}, y_l)}^{0,1}}{h_{k-1}} + \mu_k \frac{H_{i(x_{k+1}, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_k, y_l)}^{0,1}}{h_k}, \quad (14)$$

$$H_{i(x_0, y_l)}^{1,1} = (1 + \mu_1) \frac{H_{i(x_1, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_0, y_l)}^{0,1}}{h_0} - \mu_1 \frac{H_{i(x_2, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_1, y_l)}^{0,1}}{h_1}, \quad (15)$$

$$H_{i(x_K, y_l)}^{1,1} = -\lambda_{K-1} \frac{H_{i(x_{K-1}, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_{K-2}, y_l)}^{0,1}}{h_{K-2}} + (1 + \lambda_{K-1}) \frac{H_{i(x_K, y_l)}^{0,1} - H_{i(x_{K-1}, y_l)}^{0,1}}{h_{K-1}}. \quad (16)$$

Соотношений (8)–(16) позволяют определять по данным измерения напряженность магнитного поля и ее производной в пределах сетки измерения  $\Delta$ .

#### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ

Аппроксимация измеренного магнитного поля в узлах сетки выбранной на плоскости  $XY$  при  $Z = m$  с помощью кубических сплайнов осуществляется с погрешностью. Эта погрешность зависит в основном от

двух факторов, шага сетки измерения и гладкости аппроксимируемой функции внутри промежутков  $[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$ . Распределение магнитного поля  $H(x, y)$  это функция, не имеющая разрывов, ее первая производная также не имеет разрывов. Это значит, что пространственное распределение напряженности магнитного поля и ее производных являются гладкими функциями. Поэтому для выбора сетки измерения нет необходимости определять точки разрыва аппроксимируемой функции ввиду их отсутствия.

Шаг сетки измерения является основным фактором возникновения погрешности аппроксимации распределения напряженности магнитного поля. На погрешность аппроксимации влияет поведение функции внутри промежутков  $[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$ : монотонность, точки перегиба и число пиков функции. При монотонном поведении функции внутри промежутков  $[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$  погрешность будет меньше чем в тех случаях, когда в этих промежутках функция имеет точки перегиба и пиковые значения. Напряженность магнитного поля от локальных источников на плоскости имеет свои характерные черты. Она имеет потенциальный характер распространения в пространстве и при удалении от источника уменьшается. Следовательно, на плоскости имеется область с пиковыми значениями и область с монотонным убыванием (рис. 3).

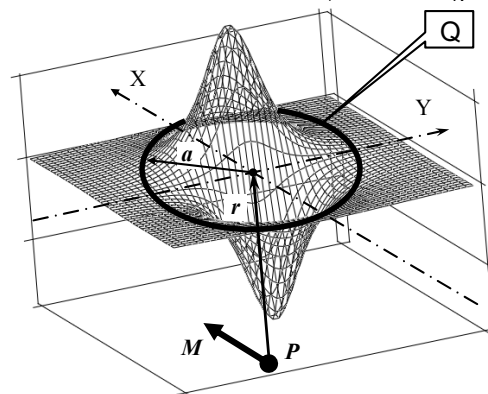


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля дипольного источника  $P$  с магнитным моментом  $M$  на плоскости

Для оценки погрешности важное значение имеет поведение функции внутри области  $Q$ , где имеются пиковые значения и точки перегиба, так как здесь находится промежуток  $[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$  с максимумом погрешности (рис. 4).

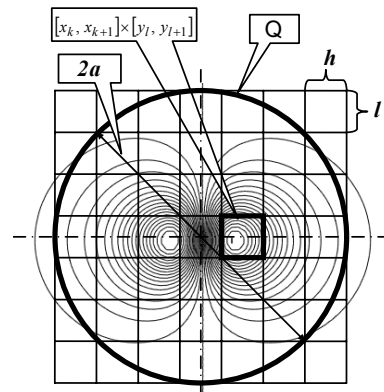


Рис. 4. Сетка измерений в области  $Q$

Внутри области  $Q$  погрешность описания сплайн-функцией зависит от числа промежутков

$[x_k, x_{k+1}] \times [y_l, y_{l+1}]$ . Чем больше промежутков, тем меньше погрешность.

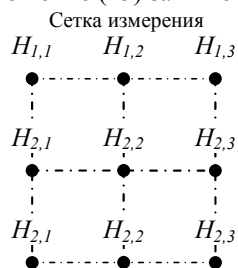
Размер  $a$  области  $Q$  зависит от расстояния  $r$  плоскости измерения до источника магнитного поля  $P$ , и изменяется пропорционально ему. При этом поведение функции внутри область не изменяется. Это дает возможность, оценив погрешности при одном расстоянии  $r=r_1$  для заданного числа ячеек сетки измерения  $N=K \cdot L$ , имеющих шаг  $h_1=2 \cdot a_1/K$  и  $\tau_1=2 \cdot a_1/L$ , определить шаг сетки измерения с такой же погрешностью на любом другом расстоянии  $r=r_2$ , который будет равен  $h_2=2 \cdot a_2/K$  и  $\tau_2=2 \cdot a_2/L$ .

Все выше сказанное позволяет установить зависимость шага сетки измерения при заданной погрешности измерения от расстояния до источника, которая определяется при  $\varepsilon = const$  по соотношению

$$\begin{cases} h_k = n_1 r \\ \tau_l = n_2 r \end{cases}, \quad (15)$$

где  $h_k, \tau_l$  - шаг сетки измерения соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ,  $r$  - расстояние от источника магнитного поля до центра области с пиковыми значениями,  $n_1, n_2$  - постоянные коэффициенты,  $\varepsilon$  - погрешность аппроксимации.

Для квадратной сетки  $n_1 = n_2 = n$  и  $h_k = \tau_l = v_k$ , а соотношение (15) запишется в виде

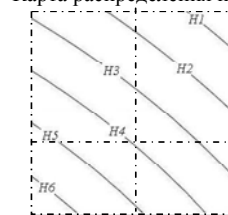


Матрица результатов измерения

$$\begin{pmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} \end{pmatrix}$$

Рис. 5

Карта распределения поля



Элементы матрицы соответствуют узлам сетки измерения. Измеренное значение магнитного поля в узле сетки записывается в соответствующий элемент матрицы. Каждый элемент матрицы имеет соответствующее местоположение на карте, в котором изображается его значение. На карте строятся кривые, представляющие собой линии равной напряженности. Построение линий равной напряженности осуществляется при помощи соотношений (7) – (16).

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика экспериментального определения распределения магнитного поля в заданном объеме помещения. Методика основана на прямых измерениях напряженности магнитного поля в заданном объеме помещения в узлах пространственной сетки. Измеренные данные представляются численно – в виде матриц и графически – в виде карт распределения магнитного поля на параллельных и ортогональных плоскостях. Для обработки первичного массива данных используется метод интерполяции кубической сплайн-функцией, обладающий малой чувствительностью к случайным ошибкам, что позволяет описывать магнитное поле в заданном объеме помещения с высокой точностью.

2. Установлена зависимость, увязывающая погрешность аппроксимации напряженности магнитно-

$$v_k = n \cdot r \text{ при } \varepsilon = const. \quad (16)$$

Например, аппроксимация распределения магнитного поля на плоскости сплайн – функцией (7) с погрешностью 1% будет осуществляться для квадратной сетки при  $n=0.2$ , а шаг измерения будет определяется по соотношению

$$v_k = 0.2 \cdot r \text{ при } \varepsilon \leq 1\%. \quad (17)$$

В табл. 1 представлены значения коэффициентов  $n$  при заданной погрешности аппроксимации.

Таблица 1

$\varepsilon\%$	1	2	3	4	5	6	7	8
$n$	0.2	0.25	0.28	0.3	0.32	0.41	0.5	0.53

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Полученную в результате измерений информацию о распределении напряженности магнитного поля в заданном объеме помещения удобно представлять на ортогональных и параллельных плоскостях, образованных на базе сетки измерения  $\Delta$ . На таких плоскостях информация представляется численно – в виде матриц и графически – в виде карт распределения магнитного поля по аналогии с картами, принятыми в геодезии.

На рис. 5 изображена сетка измерения, образованная в результате пересечения плоскостью объемной сетки измерения представленной на рис. 1 и соответствующие ей матрица чисел и карта распределения.

го поля с шагом сетки измерения и расстоянием плоскости измерения до источника поля, что позволяет при заданной погрешности описания поля определять необходимый шаг сетки измерения на любом расстоянии плоскости измерения до источника поля.

3. Предложенная методика рекомендована для решения задач управления магнитным полем в помещениях

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пелевин Д.Е., Рудас Ю.Д. Коррекция искаженного магнитного поля внутри помещений // Электротехника і електромеханіка НТУ "ХПІ", 2002 №1 С. 57-60.
- [2] Розов В.Ю., Волохов С.А., Лукиков В.С., Кильдишев А.В., Ерисов А.В. Технология снижения внешних магнитных полей судового электрооборудования // Труды Второй международной конференции по судостроению (ISC'98). – Том 2. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 22-27
- [3] Розов В.Ю., Волохов С.А., Ерисов А.В. Электромагнитный компенсатор магнитных полей технических объектов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2001. – №15. – С. 191-197.
- [4] Корн Г. Корн Т. Справочник по математике для научных работников - М: Наука, 1973. - 832 с.
- [5] Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. - М: Наука, 1980 – 202 с.

Поступила 07.08.2006

## **СОЗДАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО УЧЕБНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АППАРАТОВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Годжелло А.Г., к.т.н., проф., Жаворонков М.А., к.т.н., доц., Калашникова А.В., Нечаев Д.Н.,  
Московский энергетический институт (Технический университет)

Россия, 111250, Москва, Красноказарменная улица, д. 14, МЭИ (ТУ), каф. "Электрические и электронные аппараты"  
тел. +7 (495) 362-78-35, e-mail: denechaev@mail.ru

*Дана робота присвячена розробці випробувального стенду по дослідженню апаратів низької напруги. Описані складові стенду і дослідження, що проводяться на ній. Даний проект реалізований на кафедрі "Електричні і Електронні апарати" Московського Енергетичного інституту (Технічного університету).*

*Данная работа посвящена разработке испытательного стенда по исследованию аппаратов низкого напряжения. Описаны составляющие стенда и исследования, проводимые на нем. Данный проект реализован на кафедре "Электрические и Электронные аппараты" Московского Энергетического института (Технического университета).*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для эффективного изучения любой технической дисциплины, связанной с электротехническими устройствами, необходимо иметь в наличии реальные образцы изучаемых устройств. В связи с тем, что в результате прогресса устройства морально устаревают, желательно поддерживать лабораторную базу на должном уровне, т.е. оснащать более или менее актуальным оборудованием.

Также, как правило, в лаборатории подчас бывает сложно охватить достаточно много аспектов, необходимых для исследования и представить все опыты, которые следовало бы.

В наши дни все более широко стали использоваться компьютерные модели различных устройств. Компьютерные модели помогают решить в той или иной степени указанные выше проблемы. Компьютерные модели дают следующие преимущества:

- расширение образовательных возможностей;
- увеличение контингента обучаемых;
- углубление процесса информатизации системы образования;
- развитие возможностей внедрения информационных технологий;
- эффективность использования информационно-технической базы;
- снижение стоимости обучения.

Безусловно, эффективность изучения компьютерной модели ниже, чем изучения реального объекта. С другой стороны, студенту лучше изучать компьютерную модель современного оборудования, чем рассматривать давно не работающее и устаревшее оборудование в университетской лаборатории.

Но более рациональным решением проблемы эффективного обучения, должно являться совместное использование компьютерных моделей и реальных объектов в комплексе. Такое решение дает более широкие возможности по изучению оборудования и анализу получаемых данных.

На кафедре "Электрические и электронные аппараты" созданы комплекс виртуальных лабораторных работ (ВЛР) по изучению электрических аппаратов низкого напряжения и переносной испытательный стенд, предназначенный для исследования аппаратов низкого напряжения.

### **ВИРТУАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Любая виртуальная работа подразумевает наличие модели изучаемого устройства. Очевидно, что с методической точки зрения модель изучаемого устройства должна быть максимально подобна ее реальным прототипам, отражать как можно больше и реальнее свойства, характеристики и функции устройства.

Технология проектирования и построения виртуальной лабораторной работы состоит из следующих этапов:

- постановка задачи. Здесь определяются цель лабораторной работы, знания, умения и навыки, которые учащийся должен приобрести в процессе ее выполнения;
- разработка сценария, реализующего процесс выполнения лабораторной работы;
- разработка теоретического описания явления, которое исследуется в процессе выполнения лабораторной работы;
- разработка заданий, которые выполняются в процессе проведения лабораторной работы;
- разработка моделей и алгоритмов, описывающих исследуемое явление;
- разработка дизайна виртуальной лабораторной установки;
- программирование и отладка разработанных алгоритмов;
- разработка технической документации;
- опытная эксплуатация и доработка лабораторной работы по ее результатам.

Для создания комплекса работ был проведен анализ существующих языков программирования. HTML выбран как основной язык разметки. Простота и совместимость с HTML определили выбор языка JavaScript, как языка для написания сценариев лабораторных работ.

Элементы DHTML задействованы для повышения динамичности страниц. В частности для обновления осциллограмм, изменения конфигурации схем испытаний.

Также задействован один из элементов Active для создания и редактирования текстового файла. Создание такого файла позволяет сохранять данные, полученные в ходе выполнения лабораторных работ.

Виртуальный лабораторный комплекс, для изучения электрических и электронных аппаратов, представляет собой Интернет-сайт, доступ к которому может осуществляться через Интернет, локальную сеть или непосредственно с рабочей станции.

Комплекс лабораторных работ включает в себя виртуальные лабораторные работы:

- Автоматические выключатели.
- Контактор постоянного тока.
- Контактор переменного тока.
- Устройства защитного отключения.

Интернет технологии были выбраны за основу в связи с тем, что такое исполнение можно использовать при дистанционном обучении.

Для изучения автоматических выключателей было принято решение реализовать три опыта в соответствии с ГОСТ Р 50030.2–99, а именно: выдержка выключателей в течение часа при условных токах отключение и неотключения, снятие времятоковой характеристики, исследование селективной работы выключателей.

В основе созданных моделей лежат запрограммированные времятоковые характеристики модульных автоматических выключателей, представленные в техническом каталоге компании АВВ "System pro M".

Характеристики запрограммированы в численном виде и численные значения сведены в массив. Пользователь вводит сопротивление, по которому рассчитывается ток. Ток приводится к номинальному току выбранного выключателя. Так как количество элементов массива характеристики ограничено, то необходимо вычислять время при промежуточных значениях тока. Поэтому, по запрограммированной времятоковой характеристике вычисляется время срабатывания с применением метода линейной интерполяции. Причем вычисляются два времени срабатывания: по кривой холодного и горячего состояния.

Для исследования контакторов разработана схема, позволяющая исследовать динамические характеристики контактора постоянного тока. Реализован метод уменьшения времени срабатывания контактора и способ снижения установившегося значения тока управления.

В работе исследуются модели УЗО компании АВВ серии F360 с номинальным отключающим дифференциальным током  $I_{\Delta n} = 30$  мА. Для исследования УЗО создано три модели схем испытания. Опыты заключаются в исследовании поведения УЗО при протекании по нему условных токов повреждения различной формы.

#### АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ

На кафедре Электрических и электронных аппаратов сконструирован и собран переносной стенд по исследованию электрических аппаратов низкого напряжения.

Конструкция и техническое оснащение стенда позволяет исследовать довольно широкий спектр аппаратов низкого напряжения. Исследуется как стационарное оборудование предустановленное на испытательный стенд, так и аппараты, устанавливаемые на

DIN-рейку (автоматические выключатели, выключатели дифференциального тока (ВДТ) и др.).

Стационарное исследуемое оборудование включает в себя: контактор переменного тока с предустановленным тепловым реле К1, контактор переменного тока К2, контактор постоянного тока К3. в ходе исследования контактора К1 снимается времятоковая характеристика теплового реле, изучается конструкция магнитного пускателя и упрощенная схема пуска двигателя. При исследовании контактора К2 проверяются такие характеристики, как время срабатывания, время отпускания, напряжение срабатывания, напряжение отпускания. Исследование контактора К3 подразумевает проверку времен срабатывания и отпускания контактора постоянного тока при номинальном напряжении катушки управления.

Исследование автоматических выключателей сводится к пропуску по ним тока требуемой величины и фиксации времени срабатывания выключателя с помощью подключаемого таймера. Диапазон токов испытаний от 0 до 250А. Исследование ВДТ сводится к проверке порога срабатывания устройства, путем постепенного увеличения пропускаемого тока по одному из полюсов ВДТ. Этот ток имитирует ток замыкания на землю и тем самым проверяется значение отключающего дифференциального тока. Также проверяется исправность ВДТ нажатием кнопки "ТЕСТ".

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Электрические и электронные аппараты. Под ред. Ю.К. Розанова, М: Информэлектро, 2001. – 420 с.
- [2] ГОСТ Р 50030.2–99 (МЭК 60947-2–98). Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели.

*Поступила 07.09.2006*

## Список авторів

<b>Б</b>		<b>М</b>	
Баранов Михаил Иванович .....	5	Мороз Володимир Іванович .....	39
Бранспиз Мария Юриевна .....	15		
Бранспиз Юрий Адольфович .....	66		
Бібік Олена Василівна .....	12		
<b>В</b>		<b>Н</b>	
Васьковський Юрій Миколайович .....	19	Нечаев Денис Николаевич .....	77
		Нацик Олександр Володимирович .....	19
<b>Г</b>		<b>П</b>	
Головань Іван Васильович .....	51	Павленко Татьяна Павловна .....	44
Горбачев Модест Николаевич .....	69	Пелевин Дмитрий Евгеньевич .....	72
Гайденок Юрій Антонович .....	19	Поляков Михаил Алексеевич .....	47
Годжелло Андрей Григорьевич .....	77	Пономаренко Валентин Кузьмич .....	61
		Попович Олександр Миколайович .....	12, 51
<b>Д</b>		<b>Р</b>	
Демидюк Борис Мартынович .....	61		
		Розанов Юрий Константинович .....	55
<b>Ж</b>		<b>С</b>	
Жаворонков Михаил Александрович .....	23, 77	Себко Вадим Вадимович .....	57
<b>З</b>		<b>Т</b>	
Заблотский Николай Николаевич .....	25	Ткаченко Сергей Александрович .....	23
<b>К</b>		<b>Ш</b>	
Калашникова Арина Владимировна .....	77	Шумилов Юрий Андреевич .....	61
Клименко Борис Владимирович .....	29	Шуруб Юрій Вікторович .....	64
Конохов Николай Николаевич .....	36		
Крюков Константин Викторович .....	55		
Кузьмин Виктор Владимирович .....	61		

# Abstracts

## **ELECTROENGINEERING: Prominent events and great names**

*Baranov M.I.*

**Enriko Fermi – one of the founders of quantum statistics, electrodynamics and nuclear power engineering.**

A brief scientific-and-historical essay about the main achievements and discoveries in physics and

5 atomics made by the prominent physicist of the 20<sup>th</sup> century Enriko Fermi is given.

*Key words – physics, atomics, quantum statistics, electrodynamics, nuclear power engineering, scientific-and-historical essay.*

## **Electrical Mashines and Apparatus**

*Bibik O.V., Popovich O.M.*

**Increase in power efficiency of induction drives in quasi-static modes.**

An algorithm for performance increase reserves estimation at designing induction motors subject to real operation modes is introduced.

*Key words – induction motors, performance increase reserves, estimation.*

*Branspiz M.Yu.*

**To optimization problem formulation for a single-turn winding.**

Solutions of two optimization problems for a single-turn winding are given. It is shown that possible limitations on the initial data domain must be taken into account at an electromagnet optimization problem formulation, possible limitations.

*Key words – single-turn winding, optimization problem formulation.*

*Vas'kovski Yu.M., Gaidenko Yu.A., Natsik O.V.*

**Field theory based research on asynchronous motors under rotor parameters unsymmetry.**

Mechanical and operational characteristics of an asynchronous motor are simulated and studied by means of field theory methods in asymmetrical operation conditions under the rotor bars break. Peculiarities of electromagnetic field distribution in the active zone of the motor under presence of the damaged bars are analyzed.

*Key-words – asynchronous motor, rotor bars break, mechanical and operational characteristics.*

*Javoronkov M.A., Tkachenko S.A.*

**Diagnostics of every-day availability of electromechanical switching devices.**

The article is devoted to research into every-day availability of electromechanical switching units and analysis of results. The research is conducted at Electric and Electronic Apparatus Department of Moscow Power Engineering Institute (Technical University).

*Key words – electromechanical switching device, every-day availability, research.*

*Zablodsky N.N.*

**Interaction of a screw electro-thermo-mechanical converter and loading-cooling medium**

Processes of heat transfer and friction at interaction of electro-thermo-mechanical energy converters and loading-cooling medium are investigated.

*Key words – heat transfer, electro-thermo-mechanical converter, loading-cooling, medium.*

*Klimenko B.V.*

**International Electrical Vocabulary – Ukrainian prospects**

We continue publishing translation of selected parts from International Electrical Dictionary (IED), namely, section 441 - *Switchgear, control-gear and fuses*, into Ukrainian. In the paper, trans-

12 lation of section 441-14 – *Switching devices* - is presented.

*Key words – International Electrical Dictionary, section 441-14 – Switching devices, terms and definitions, translation into Ukrainian.*

*Konohov N.N.*

**Structural analysis and principle of symmetry at perfection of electric machine design.**

15 The history of theory of systems and theory of symmetry and their application to analysis of separate elements and units of electric machines (EM) are considered. Problems of EM design perfection are considered from the general points of theory of systems and theory of symmetry. Advantages of development of EM design with a radial-axial cooling system (a symbol of *n:m* symmetry) versus advantages of EM design with an axial cooling system are analyzed.

*Key words – electric machine design, principle of symmetry, structural analysis.*

*Moroz V.I.*

**Application of integral equations to simulation of controlled electromechanical systems.**

An example of integral equations application to simulation of controlled electromechanical systems is described in this paper. Analysis of accuracy and rational order of the numeric integration formula is made with implicit Adams methods.

*Key words – integral equations, controlled electromechanical systems, computer simulation, numeric methods accuracy.*

*Pavlenko T.P.*

**Influence of activation on electric contacts wear.**

23 In the paper, problems of activation process action on electric contact wear are considered. Taking into account features of the contact material, namely, thermionic activity at production and operation in real conditions, we make a conclusion that this contact composition can be used in electric apparatus with arc commutation.

*Key words – activation process action, electric contacts wear, thermionic activity.*

*Polyakov M.A.*

**A fuzzy regulator of power oil-immersed transformer cooling on the basis of disturbance factor change prediction.**

25 The structure and principles of a fuzzy regulator design for power oil-immersed transformer cooling are analyzed, the regulator employs linguistic variables of load current and environment temperature change prediction for the purpose of transformer isolation thermal wear minimization.

*Key words – power oil-immersed transformer, cooling, fuzzy regulator, disturbance*

36

39

44

47



### factor change prediction.

*Popovich O.M., Golovan I.V.*

### Research on asynchronous motors with a massive ferromagnetic rotor at an increased power supply frequency.

A mathematical model for starting characteristic shaping for asynchronous motors with frequency-dependent parameters of the rotor is introduced; the model takes into account equivalent circuits of eddy-current losses in the stator and the rotor steel.

*Key words – asynchronous motor, starting characteristic shaping, mathematical model.*

*Rozanov Y.K., Kriukov K.V.*

### A power flow controller with a photovoltaic converter.

The paper introduces a scheme of a power flow controller with a photovoltaic converter on the dc side. Also, the paper discusses ways of efficiency increase for systems with photovoltaic converters. The work is conducted at Electric and Electronic Apparatus Department of Moscow Power Engineering Institute (Technical University).

*Keywords – multiconverter, power flow controller, photovoltaic converter, dc-dc converter.*

*Sebko V.V.*

### Research into transient process of air-layer heating between a heater and a product under the heater temperature alternation.

The transient process of air-layer heating between a heater and a product under the heater temperature alternation is studied. For a specific examples, solutions of a heat-balance equation describing transient heating of an air layer between the heater

51 winding and a product are found: a general stationary solution  $\Delta t_B^*$ , a partial nonstationary solution  $\Delta t_B^{**}$  and the complete decision  $\Delta t_B$ . Heating time dependences of the solutions are plotted.

*Key words – transient heating, heat-balance equation solutions, air layer, temperature alternation.*

*Shumilov Yu.A., Ponomarenko V.K., Kuz'min V.V., Demidyuk B.M.*

### Generator reliability control in nuclear, hydro- and heat power plants.

55 A necessity for on-line monitoring and diagnostics of large generators state so as to prevent the generators breakdown is justified. It is proposed to replace preventive maintenance by maintenance over significant abnormality of the reliability index.

*Key words – power plant generators state, on-line monitoring and diagnostics, maintenance.*

*Shurub Yu.V.*

### Improvement of operational properties of three-single-phase induction electric drives in starting modes.

57 A way of improvement of operational properties of three-single-phase induction electric drives through application of combination circuits is introduced, a mathematical model is developed to analyze dynamic processes resulting from circuit switching in such electric drives.

*Key words – induction electric drive, combination circuit, mathematical model, operational properties improvement.*

## Electrical Engineering: Theory

*Branspiz Yu.A.*

### Analysis of einstein's mental experiment on determination of magnetic field component acting on electric current in a ferromagnetic conductor.

It is shown that accounting of the disk thickness in Einstein's mental experiment does not allow making an unambiguous conclusion about description of force action on electric current in a magnetic material through magnetic field intensity or induction. The way of description of the magnetic field force action on the magnetic material turns out essential.

*Key words – electric current, magnetic material, Einstein's mental experiment, force.*

*Gorbachev M.N.*

### Geometric simulation of periodic inharmonic energy processes in controlled radio circuits and systems.

The paper presents and substantiates a principle of geometric simulation of periodic inharmonic energy processes in controlled radio circuits and

66 power supply systems for radio equipment with employment of mathematical theory of field.

*Key words – controlled radio circuits and systems, periodic inharmonic energy processes, geometric simulation, mathematical theory of field.*

*Pelevin D.E.*

### Initial data determination for electromagnetic devices of magnetic field control indoors

72 An initial data determination method for electromagnetic devices intended for magnetic field control indoors is developed. The method is based on direct measurement of magnetic field strength in specified indoor space at space mesh points. The initial array is processed by a cubic spline interpolation method. The initial data are represented quantitatively as matrixes and graphically as magnetic field distribution cards on parallel and orthogonal planes.

*Key words – magnetic field control, magnetic field strength, measurement, electromagnetic devices, cubic spline function.*

## Education Structure in

## "Electrical Engineering" and "Electromechanics"

*Godzhello A.G., Zhavoronkov M.A., Kalashnikova A.V., Nechaev D.N.*

### Creation of a universal training test bench for research on low-voltage apparatus

The work is devoted to development of a test bench for research on low-voltage apparatus. The bench constituent elements and research done on

77 the bench are described. This project is realized at Electric and Electronic Apparatus Department of Moscow Power Engineering Institute (Technical University).

*Key words – low-voltage apparatus, research, universal training test bench.*

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ І ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В НАУКОВО-ПРАКТИЧНОМУ ЖУРНАЛІ "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА"

Шумилов Ю.А., д.т.н., проф.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"  
Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, НТУУ "КПІ", кафедра "Електромеханіка"  
тел. (044) 241-76-38

Клименко Б.В., д.т.н., проф.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"  
Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра "Електричні апарати"  
тел. (057) 707-62-81, факс (057) 707-66-01, E-mail: eie@kpi.kharkov.ua

*Текст анотацій українською мовою, до 5 рядків (для громадян України).*

*Текст анотацій на російській мові, до 5 рядків.*

### ВСТУП

У журналі публікуються результати досліджень і огляди у області електричних машин і апаратів, сильних магнітних полів і теоретичної електротехніки, що не публікувалися раніше, методичні матеріали по напрямках підготовки "Електротехніка" і "Електромеханіка", а також інформаційні матеріали за профілем журналу.

Пакет документів, що направляється в редакцію повинен містити:

1) у друкованому варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал (1 екз.) виконаний на аркушах паперу формату А4 густиною 80 - 90 г/м<sup>2</sup>, віддрукований на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 300 dpi;

— акт експертизи з печаткою (для громадян України). Офіційний лист з проханням опублікувати статтю (для громадян зарубіжних країн);

— рецензія (підписується доктором наук і засвідчується печаткою);

— копія документа про оплату за публікацію.

2) в електронному варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал, виконаний у відповідності до даних вимог (без колонтитулів і нумерації сторінок);

— анотація англійською мовою (автори, назва статті, анотація, ключові слова);

— відомості про авторів (прізвище, ім'я, по-батькові повністю, дата народження, місце роботи, посада, основні напрями наукової діяльності).

Анотація і відомості про авторів виконуються у вигляді окремого документа Microsoft Word і з довільним форматом.

Оригінал статті або інформаційних матеріалів готується тільки з використанням редактора Microsoft Word однією з трьох мов: українською, російською або англійською.

### ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТІ

Всі розділи документа повинні містити поля: зліва, справа, зверху – по 20 мм, знизу – 25 мм. Заповнення останньої сторінки повинне бути не менше 80%.

Заголовок статті містить:

— код УДК;

— назва статті (Times New Roman 12pt, жирний, розміщення по центру, заголовні букви, не допускаються перенесення);

— список авторів, вчений ступінь (при необхідності звання і посада), назва організації, поштова адреса, контактні телефони (факс, E-mail). Для авторів різних організацій список приводиться по даній вище формі; — анотації статті українською (обов'язково тільки для громадян України) і російською мовою, обсягом до 5 рядків кожна, оформляються шрифтом Times New Roman 9 pt, жирний, курсив.

Між елементами заголовку статті робиться інтервал в один рядок 10 pt.

### ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Текст розміщується у двох колонках, відстань між якими 5 мм. Абзацні відступи (червоний рядок) – 7,5 мм. Текст набирається шрифтом Times New Roman 10 pt з одиночним міжрядковим інтервалом. Допускається розділення тексту на розділи. Назва розділу оформляється заголовними буквами і центрується, нумерація – не обов'язкова (розділи ВСТУП, ВИСНОВОК і ЛІТЕРАТУРА, якщо такі є, не нумеруються). Перед назвою розділу вставляється один порожній рядок.

Рисунки і широкі таблиці допускається розміщувати в одну колонку. Назва виконується шрифтом розміром 9 pt. Допускається використання рисунків і таблиць без назви: Рис. 1, Табл. 1.

Таблиця 1

Розміри полів тексту статті

Поле зліва	20 мм
Поле справа	20 мм
Поле зверху	20 мм
Поле знизу	25 мм

Рисунки розташовуються у окремих абзацах, з вирівнюванням по центру і оформляються як окремі об'єкти, виконуються в редакторі рисунків Microsoft Word або вставляються в текст статті у форматі bmp або jpg.

Розташування рисунка поверх тексту і застосування альбомної орієнтації не допускається.

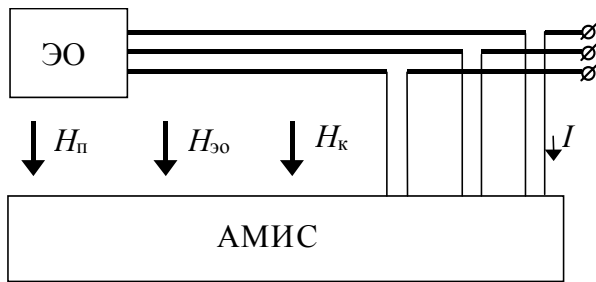


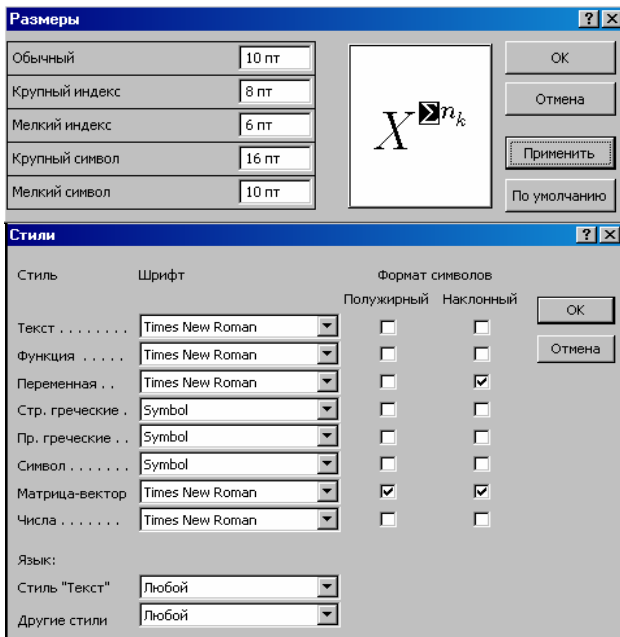
Рис.1. Функціональна схема пристрою

Математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів тільки в редакторі формул Microsoft Equation, розташовуються по центру і нумеруються в межах статті, номер притиснутий до правої сторони колонки. За формулою має слідувати розділовий знак, а якщо формула містить пояснення, то вони повинні починатися з нового абзацу із слова "де" без відступу

$$N = \frac{\tau_{u \max}}{T_{k \text{ внутр}}}, \quad (1)$$

де  $\tau_{u \max}$  - ...,  $T_{k \text{ внутр}}$  - ...

Настройки редактора формул для меню "Розмір" і "Стиль" символів представлені нижче:



Кириличні символи у формулах повинні бути виконані в стилі "Текст".

Щоб уникнути різного роду накладень символів у формулах не рекомендується застосовувати символ ділення /, букву  $\ell$ , а також змінювати розмір об'єкту формули. Крім того, необхідно використовувати символ множення у вигляді крапки.

Великі вирази і рівняння необхідно записувати в декілька рядків

$$Y = \varphi_0(S_n) + \gamma_0 \cdot \int_{S=0}^{S_n} \varphi_0 \cdot \sin(S_n - S) \cdot dS + \gamma_0^2 \cdot \int_{S=0}^{S_n} P_0(S) \cdot \cos(S_n - S) \cdot dS. \quad (2)$$

Символи у формулах і в тексті статті повинні мати однакові зображення.

Перелік літератури розміщується в кінці тексту. Розмір шрифту - 9пт. Після відступу одного порожнього рядку (10пт) від основного тексту по центру колонки розташовують слово ЛІТЕРАТУРА. Нумерація джерел – у порядку посилань по тексту або в алфавітному порядку, номер поміщається у квадратних дужках з виступом.

### ВИСНОВОК

Якщо Ви робите посилання на формули, рисунки, таблиці або літературу, необхідно використовувати наступні позначення: (1), (1) і (2), (1) – (4); рис. 1, рис. 1,а, рис. 1 і 2; табл. 1, табл. 1 і 2; [1], [1 – 3, 5].

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] P.V. Johns, "A symmetrical condensed node for the TLM method", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-35, Apr. 1997, pp. 370-377.
- [2] Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 272 с.
- [3] Лавров В.Я. Численно-аналитический метод расчета помехонесущих магнитных полей // *Техн. электродинамика.* – 1983. - № 61. - С. 18-21.
- [4] Пат. 14813 А Україна. МКИ G 01 R 33/24. Спосіб визначення залишкової та індукованої складових компонента магнітної індукції статичного зовнішнього магнітного поля феромагнітного виробу / А.В. Єрисов, В.С. Лупіков, В.Ю. Розов та ін.— №95125251; Заявлено 12.12.95; Опубл. 30.06.97. Бюл. №3. — 6 с.
- [5] Минкевич А.В. Физическое пространство — время и релятивистская космология // *Тез. докл. 10-й Росссийск. Гравитац. конф. "Теоретические и экспериментальные проблемы общей теории относительности и гравитации"* (г. Владимир, 20-27 июня 1999 г.). — М.: РГО, 1999. — с. 84.

В кінці статті, через інтервал в 1-2 рядки розміром 10пт, мовою оригіналу вказують дату надходження статті в редакцію журналу (розмір 9пт, курсив, розташування по правому краю). Наприклад:

Поступила 02.07.2007

або

Надійшла 02.07.2007

Матеріали приймаються за адресою:

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

Електронні варіанти матеріалів по E-mail: [kbv@kpi.kharkov.ua](mailto:kbv@kpi.kharkov.ua) [eie@kpi.kharkov.ua](mailto:eie@kpi.kharkov.ua)

Довідки за телефонами: (057) 707-62-81 Клименко Борис Володимирович, Злуніцина Наталя Ростиславівна

**НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ**

*Електротехніка і Електромеханіка*  
*Электротехника и Электромеханика*  
*Electrical engineering & Electromechanics*  
**2007'3**

ISBN 966-593-254-3



Технічне редагування:

Смельянов Вадим Леонідович

т. (057)707-69-76

E-mail: [evl@kpi.kharkov.ua](mailto:evl@kpi.kharkov.ua)

Секретар редакції:

Злуніцина Наталя Ростиславівна

т. (057)707-62-81

E-mail: [seb@kpi.kharkov.ua](mailto:seb@kpi.kharkov.ua)

Підписано до друку 31.05.2007 р.

Формат 60 × 90 1/8. Папір Prima Copy

Друк - офсетний. Ум. друк. арк. 10,5.

Наклад 300 прим. 1-й завод - 123. Зам. № 592. Ціна договірна.

---

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

---

КП Друкарня №13. 61002, Харків, вул. Артема, 44

---