



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славені імена

Баранов М.И.	Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 1: открытие периодического закона химических элементов	3
Гречко А.М.	Электромагнитные реле. Через тернии к звездам	10

Електричні машини та апарати

Байда Е.И.	Сравнительный анализ моделей конвективной теплоотдачи	14
Болюх В.Ф., Щукин И.С.	Особенности теплового режима индукционно-динамического двигателя циклического действия	18
Волкова О.Г.	Влияние усилия замыкания разрывных контактов на переходное сопротивление	25
Литвиненко Д.Г.	Математические модели асинхронного электропривода с векторным управлением для задач оптимизации полиномиальным методом с использованием диаграмм качества управления	27
Милых В.И., Ткаченко С.В.	Математическая модель и анализ импульсного режима работы линейного электродвигателя при независимом питании его обмоток	31
Сосков А.Г., Дорохов О.В., Сабалаєва Н.О., Соскова І.О., Форкун Я.Б.	Гібридний контактор з додатковими рухомими контактами	37
Фомин В.И.	О селективной работе предохранителей в полупроводниковом преобразователе при внутреннем коротком замыкании	40

Теоретична електротехніка

Придубков П.Я., Хоменко І.В.	Дослідження еквівалентності струмів лінійного трансформатора вхідному і вихідному струмам його схеми заміщення	43
---	--	-----------

Техніка сильних електричних та магнітних полів

Баранов М.И., Кравченко В.И., Носенко М.А.	Экспериментальные исследования электротермической стойкости металлических элементов летательного аппарата к прямому воздействию тока искусственной молнии. Часть 2: стойкость медных проводов и кабелей	46
Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Смирнов Д.О.	Цилиндрический виток конечной ширины с разрезом над идеально проводящим массивным проводником	56
Живанков К.И., Михайлов В.М.	Об исключении сжатия цилиндрической оболочки после "среза" импульса внешнего магнитного поля	61

Набока Б.Г.,
Беспрозванных А.В.,
Москвитин Е.С.,
Бутко М.В.,
Бутко С.М.,
Головань А.А.

Диагностика кабельных линий энергосистем по тангенсу угла диэлектрических потерь и постоянной времени саморазряда бумажно-пропитанной изоляции

65

Безпека електрообладнання

Мясников В.Е.

О пожарной безопасности электротехнических изделий

70

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

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

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перереєстровано постановою президії ВАК України від 10 лютого 2010 р. № 1-05/1. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.

Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу «Електротехніка і Електромеханіка» та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (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 2008 рік розміщено на сайті НТУ «ХП» (<http://www.kpi.kharkiv.edu/eie/>).

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

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

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

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 1: ОТКРЫТИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗАКОНА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наведено короткий нарис із історії відкриття наріжного фундаментального закону природи – періодичного закону Менделєєва, що розкриває глибинні таємниці всесвіту.

Приведен краткий очерк из истории открытия краеугольного фундаментального закона природы – периодического закона Менделеева, раскрывающего глубинные тайны мироздания.

ВВЕДЕНИЕ

Главное предназначение науки и ученых – дать человечеству верное представление о природе и соответственно дать людям верную картину устройства живой (неживой) материи окружающего нас мира и указать пути его дальнейшего развития. Начиная с 17-го столетия, практически через каждые 15 лет число людей в мире, занятых наукой, и число сделанных ими научных открытий и изобретений увеличивается вдвое [1]. Наука постепенно из людского увлечения стала особым видом человеческой деятельности. Этот вид деятельности (работы) является, как правило, тяжелым "каторжным" трудом, иногда приносящим ученым радость и большое удовлетворение от впервые сделанного ими. Именно ими из огромного многомиллионного исследовательского корпуса научных работников мира. В эти редкие минуты своего апофеоза (кульминации в совершенном ими научном событии) они испытывают гордость за себя, за свой институт (университет) и за свою державу. Развитие мировой науки и техники привело к стремительному развитию человечества. Совершенные учеными великие открытия и изобретения коренным образом изменили наш мир и привели на Земле к расцвету современной технической цивилизации. Важно, интересно и поучительно (особенно для молодежи) обобщать накопленные человечеством знания из различных областей его многогранной деятельности и представлять их в сжатом, понятном и доступном для многих печатном виде. Слово "антология", вынесенное автором в название этой весьма обширной по его задумке серии научно-исторических статей, имеет греческие корни и в переводе слова "anthologia" буквально означает "букет цветов" и используется в лирике и прозе для обозначения "наиболее представительной подборки литературных сочинений" [2]. Вот на примере такой наиболее представительной с исторических позиций и принятой международной научной общественностью подборки основных выдающихся научно-технических достижений человечества автор решил с его определенными комментариями показать нарастающие успехи земной цивилизации в области науки и техники. Эту научно-техническую подборку начинаем с наиболее великих открытий, находящихся у истоков науки.

1. СОСТОЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ НАУКИ И ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ 19-го ВЕКА

Теоретическая химия в первой половине 19-го столетия оказалась в научном тупике: обладая атомной теорией, объясняющей количественные измене-

ния при химических процессах соединения различных атомов, она была не в состоянии объяснить причину соединения между собой атомов вещества. Первую попытку в объяснении причин соединения атомов сделал знаменитый шведский химик Йенс Берцелиус [3]. Используя результаты научных работ предшествовавших ему ученых (например, электрохимические работы от 1834 года великого английского физика Майкла Фарадея по электролизу [4, 5]), свидетельствующих об разложении электрическим током сложных веществ на две положительно и отрицательно заряженные части, он пришел к мысли о природе сил, лежащих в основе химического взаимодействия атомов или химического "сродства" элементов. По его мнению, их (атомы) связывают *электрические силы*. Он уже в 30-е годы 19-го века утверждал, что каждый атом имеет два электрических заряда – положительный и отрицательный [3]. Один из этих зарядов пересиливает другой и поэтому химические элементы становятся либо электроположительными (например, водород и все металлы), либо электроотрицательными (например, хлор и другие элементы). Так как противоположные электрические заряды притягиваются, то поэтому и возникают по Берцелиусу химические соединения между противоположными по свойствам элементами. Многие ученые сразу оценили достоинства и глубокий смысл этой новой электрохимической теории И. Берцелиуса. Среди них был и профессор Московского университета имени М.В. Ломоносова – Михаил Григорьевич Павлов [3]. Важно отметить, что этот русский ученый-химик крупнейшим достижением мировой науки конца 18-го и начала 19-го столетий считал *открытие электрического тока*. В свое время он написал [3]: *"Изобретение электрической батареи служит достойным заключением блистательных успехов естественных наук в прошлом столетии"*. М.Г. Павлов относил электрические процессы к числу наиболее важных в природе. И когда только шведский ученый И. Берцелиус попытался с помощью *электричества* объяснить сущность химических процессов, русский ученый М.Г. Павлов тут же дал новое толкование его теории, которое существенно опережало теоретические представления И. Берцелиуса. В своей статье *"О полярно-атомической теории химии"* этот русский ученый утверждал, что *"постоянные по величине и весу частицы, образующие тело, при химических соединениях не проникают друг в друга, а одна к другой присоединяются. Частицы сии означаются именем атомов"* [3]. Как же эти атомы один на другой действуют? М.Г. Павлов на этот

вопрос в далеком от нас 19-ом веке отвечал так [3]: *"Предшествующие и последующие обстоятельства химического соединения показывают, что при сем возбуждаются противоположные электричества. А поскольку химическое соединение совершается между атомами, то между ними же должно быть и возбуждение противоположных электричеств. В сем и состоит взаимное атомов одного на другой действие"*. Из приведенного выше становится ясным, что, если И. Берцелиус считал атомы всегда несущими тот или иной пересильный (избыточный) электрический заряд, то М.Г. Павлов в своей электрохимической теории утверждал, что **электрические заряды атомов** возбуждаются в процессе их химического взаимодействия. Это был принципиально новый взгляд русского ученого на процесс химического взаимодействия атомов вещества. Кстати, современная теоретическая и экспериментальная физика (химия) подтверждают эту гениальную гипотезу М.Г. Павлова. С помощью их точных методов исследования было однозначно установлено, что в обычных условиях все атомы электронейтральны. Они (атомы) могут приобретать избыточные электрические заряды лишь в процессе химического соединения или в результате специальных внешних воздействий на них (например, действия на электронейтральные атомы температурного, электромагнитного и радиационного полей). К 1827 году мировая химия знала 52 химических элемента, а к 1869 году – уже 63 элемента [3].

2. УЧЕНИЕ ОБ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

История науки показывает, что представление об химических элементах – простейших вещественных составных частях всех физических тел разрабатывалось ("выковывалось") наукой долгими веками. Между элементами древних – воздухом, водой, землей и огнем и современными элементами – атомами вещества исторически располагались элементы алхимиков: сера, ртуть, соль и невесомые элементы – "огненная материя" (флогистон), "теплотворная материя" (теплород), "световая материя", "материя упругости", "материя тяжести", "магнитная материя" и другие. Алхимики средневековья считали, что золото является золотом потому, что оно имеет желтый цвет, большой удельный вес и другие известные свойства. По их (алхимиков) мнению свойства образуют тела. Хотя в действительности, тела обладают свойствами (всем нам теперь это кажется само собой разумеющимся). Поэтому не свойства являются элементами и соответственно его (тела) первичными составными частями. Настоящие элементы – сами вещества с присущими им свойствами. Но вещества простейшие, не состоящие из еще более простых веществ. Причем, глядя из современных научных вершин, из простейших веществ с присущими только им характерными свойствами, а не из элементарных частиц. Вот такое новое **учение об элементах** предложил в 1661 году знаменитый английский ученый Роберт Бойль (1627–1691 гг.), ставший в 1680 году президентом такой известной во всем мире научной организации как Лондонское Королевское общество [1, 6]. Это учение оказалось большим вкладом в физическую и химическую

науку, обессмертившим имя Р. Бойля в их истории. Кроме того, он первым получил в чистом виде такой химический элемент как белый фосфор Р. Учение Р. Бойля об элементах – простейших веществах было крупнейшим достижением физики и химии за почти 20 веков, прошедших со времен великого ученого древности грека Аристотеля и его античного учения о первоэлементах (огня, воздуха, воды и земли) [3, 7]. Разрушив алхимические "начала" и средневековые ошибочные представления об элементах-свойствах, Р. Бойль расчистил и исторически подготовил место для построения здания новой химии – науки о превращениях веществ в микро– и макрообъемах.

3. УЧЕНИЕ ОБ АТОМАХ

Наблюдая разнообразные явления природы, древнегреческий философ Демокрит, стремящийся проникнуть в тайны строения земного вещества, пришел к важному выводу, что все вещества имеют зернистую прерывистую внутреннюю структуру. Он утверждал [3, 7], что все в мире состоит из бесчисленного множества разнообразных мельчайших частичек, разделенных между собою пустотой (в современном представлении "вакуумом", происходящим от латинского слова "vacuum" – "пустота" [2]). Эти частички ничтожно малы и недоступны зрению человека. Поэтому макротела и кажутся человеку сплошными. Эти частички существуют вечно, они никогда не возникают и никогда не уничтожаются. Эти частички находятся в постоянном движении, то соединяясь друг с другом, то разлетаясь в разные стороны. По Демокриту эти частички не состоят из более мелких и простых частей. Поэтому Демокрит и назвал эти частички, из которых состоят все физические тела, "атомами" (это понятие происходит от греческого слова "atomos" – "неделимый" [2]). Здесь будет уместным привести глубокое по содержанию и короткое по форме знаменитое высказывание самого Демокрита [3]: *"Обыкновенно мы говорим о сладком и горьком, о теплом и холодном, о цвете и запахе. В действительности же существуют только атомы и пустое пространство"*. Великая догадка Демокрита, высказанная им почти 2,5 тысячи лет тому назад, на много веков так и оставалась только догадкой (гипотезой), не превратившейся в научную теорию. Только в 18-ом столетии великий русский физик и химик Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765 гг.) с проницательностью гения обратился к зернам истины, содержащимся в трудах Демокрита в учении об атомах. В руках академика Петербургской Академии наук (ПАН) по кафедре химии М.В. Ломоносова атомное учение впервые становится орудием научного исследования. Атомистическая теория строения физических тел нашла свое прямое научное применение в его диссертации *"Размышления о причине теплоты и холода"*, написанной им в 1744 году и зачитанной в январе 1745 года на заседании ПАН [3, 7]. Данная диссертация в 1747 году была послана на отзыв проживающему за границей в г. Берлине действительному члену ПАН, ученому с мировым именем Леонарду Эйлеру (1707–1783 гг.). В 1750 году диссертация М.В. Ломоносова была напечатана в журнале *"Новые комментарии император-*

ской Петербургской Академии наук" на латинском языке и разслана всем иностранным академиям. Выдающаяся научная работа русского ученого получила широкую известность в научном мире. Новые научные взгляды М.В. Ломоносова зачастую были противоположны принятым западными "великими мужами" от науки. После нескольких лет острых дискуссий на европейской научной "кухне" по диссертации М.В. Ломоносова и положительного отзыва на нее великого Л. Эйлера молекулярно-кинетическая теория теплоты М.В. Ломоносова стала завоевывать все больше своих приверженцев. Появление теории теплоты, разработанной русским ученым, было величайшим событием в истории физики [4, 7]. Впервые к научному объяснению физического явления нагрева тела была применена атомная теория, объясняющая теплоту через движение атомов и молекул вещества. Основываясь на учении об атомах, М.В. Ломоносов далее в 1748 году создал теорию упругости воздуха. Сейчас эта усовершенствованная теория называется молекулярно-кинетической теорией газов. Пользуясь этой теорией, он осуществил математический вывод химического закона Бойля-Мариотта, открытого его авторами опытным путем. В 1753 году М.В. Ломоносов доложил на заседании ПАН свою новую работу "Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих" [7, 8]. В этой работе он представил первую в мире теорию **атмосферного электричества** и объяснил ряд загадочных явлений природы (например, резкие похолодания после оттепели зимой и летние грозы). В основу этих явлений М.В. Ломоносов положил состояние воздуха, являющегося смесью газов и скоплением беспорядочно движущихся частичек и входящих в состав его газов атомов. Восходящие и нисходящие потоки воздуха и определяют, по его мнению, эти явления природы. В то далекое время он писал [3, 7]: "В восходящем потоке воздуха частички насыщающих воздух паров скорым встречным движением сражаются, трутся, электрическую силу рождают, которая, распространяясь по облаку, весь оный занимает". Электрические заряды, накопленные в большом количестве атмосферным облаком таким электрофизическим путем, и вызывают по Ломоносову грозные электрические разряды (молнии). Эти научные работы великого русского физика (химика) М.В. Ломоносова доказали всему просвещенному миру то, что **учение об атомах** вещества является истинным фундаментом физической науки и химии.

4. УЧЕНИЕ О ВАЛЕНТНОСТИ АТОМОВ

В 1853 году английский химик Франкланд, изучая соединения металлов с органическими "радикалами" (одинаковыми группами атомов или строительными "блоками" длинных органических молекул), установил, что атом металла может удерживать возле себя лишь строго определенное число этих "радикалов". Например, атом натрия *Na* имеет способность к соединению (имеет химическую емкость насыщения) только с одним таким "радикалом". Атом цинка *Zn* имеет емкость насыщения уже вдвое большую. У атома алюминия *Al* эта емкость простирается до трех "радикалов". Определенной химической емкостью

насыщения, то есть свойством соединяться лишь со строго определенным числом "радикалов" или атомов другого вещества, обладают все химические элементы. Открытие англичанина Франкланда по-новому осветило понятие химического "сродства" элементов – способности атомов к соединению друг с другом. Теперь получалось, что у атомов химическое "сродство" разделено на определенные, равные между собой и одинаковые для атомов любых химических элементов порции. Соединение между атомами не образуется, пока каждая из этих порций не будет насыщена соответствующей порцией химического "сродства" другого атома. Число же этих порций или единиц "сродства" характерно для каждого химического элемента. Оказывается как все просто в механизме атомных соединений! Но за этой простотой прячутся долгие столетия кропотливой работы лучших умов мира. Способность обладать определенным числом единиц (порций) химического "сродства", то есть способность присоединять к себе лишь строго определенное число атомов ("радикалов"), в середине 19-го столетия ученые-химики называли "атомностью", а впоследствии – "**валентностью**" химических элементов [3, 7].

В этой связи химические элементы, емкость насыщения которых была равна одной единице (порции) химического "сродства" получили название **одновалентных** элементов (например, литий *Li*, натрий *Na* и другие). Элементы же, атомы которых способны удерживать возле себя два одновалентных атома (например, цинк *Zn*, кислород *O* и другие), стали именоваться **двухвалентными** элементами и т.д. Валентность стала одним из важнейших свойств химических элементов. Учение о валентности атомов было в 1858 году использовано выдающимся русским химиком, профессором ведущего учебного заведения России Казанского университета Александром Михайловичем Бутлеровым (1828–1886 гг.) при создании им главной теории органической химии – структурной теории [3, 9]. Так как каждому атому вещества свойственна определенная валентность, рассуждал А.М. Бутлеров, то вступая в химическое соединение, атомы затрачивают все свои валентности на связь друг с другом. Образующаяся в результате такого химического соединения молекула является не случайным нагромождением атомов. Взаимно насыщая свои валентности, атомы вещества по Бутлерову вынуждены располагаться в составе молекулы в строгом порядке. Вот в этом вкратце и заключается главная физико-химическая сущность структурной теории или теории соединения А.М. Бутлерова [3, 9]. Он в 1861 году на 36-ом съезде немецких естествоиспытателей в докладе "**Нечто о химическом строении тел**" о новых задачах химии говорил [3]: "**Формулы на основе теории типов (типические формулы) должны выйти из употребления. Пора основать понятия наши о химических свойствах веществ на идеях валентности и химического строения**". Научная идея русского ученого-химика А.М. Бутлерова о построении молекул по законам валентности указала химической науке и ее истинным сторонникам верный путь к выяснению зависимости между строением молекул вещества и свойствами физических тел из них состоящих.

5. ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН МЕНДЕЛЕЕВА

Именно теми основными теоретическими звеньями в "цепи" научного поиска, ведущего молодого русского ученого-химика Дмитрия Ивановича Менделеева (1834–1907 гг.) к открытию им в 1869 году основного закона атомов химических элементов, как раз и оказались приведенные и вкратце описанные нами выше: во-первых, учение об химических элементах; во-вторых, учение об атомах химических элементов; в-третьих, учение о валентности атомов. С учетом этих учений талантливому Д.И. Менделееву (рис. 1) стало ясно, что каждый химический элемент может быть охарактеризован двумя важнейшими свойствами: весом и валентностью его атомов. Рассматривая эти свойства для различных веществ, Д.И. Менделеев обратил внимание на глубокую разницу в характере изменения этих свойств для химических элементов.



Рис. 1. Д.И. Менделеев (1834–1907 гг.)

По атомному весу все известные ему в количестве 63 названий элементы (виды или сорта атомов) различались в широком пределе. Наряду с легчайшим атомом водорода *H* имелись и тяжелые атомы, вес которых в 200 с лишним раз был тяжелее веса атома водорода (например, урана *U*). В тоже время валентность атомов различных химических элементов численно изменялась в достаточно узких пределах: от 1 до 7 (к концу 19-го столетия было установлено, что при нулевой валентности группа элементов практически не вступала в химические реакции и образовывала так называемые "благородные" газы – гелий *He* и другие). В настоящее время нам точно известно, что валентность атомов вещества определяется числом неспаренных связанных электронов на внешних *s*- и *p*-электронных оболочках (энергетических уровнях) атомов [10, 11]. Максимальное число валентных электронов в атомах может составлять восемь. Образование таких полностью заполненных связанными электронами подоболочек в атомах приводит к созданию устойчивых внешних электронных слоев и соответственно к появлению устойчивых химических элементов (восьмой группы элементов). Именно валентные электроны и определяют химические свойства атомов и молекул. Во времена творческой работы Д.И. Менделеева в области систематизации химических элементов эти научные положения были не известными (да и сам электрон еще не был открыт). Русскому ученому для облегчения работы пришлось выписать на картонных карточках названия некоторых химических элементов с одинаковой валентно-

стью [3, 7]: *одновалентные* – натрий *Na*, калий *K*, литий *Li*; *двухвалентные* – кальций *Ca*, магний *Mg*, барий *Ba*; *трехвалентные* – алюминий *Al*, бор *B*; *четырёхвалентные* – углерод *C*, кремний *Si*; *пятивалентные* – азот *N*, фосфор *P*, мышьяк *As*; *шестивалентные* – кислород *O*, сера *S*, селен *Se*; *семивалентные* – хлор *Cl*, фтор *F*, бром *Br*. Было видно, что элементы каждой из этих групп валентности очень схожи по своим химическим свойствам. Если *одновалентные* – типичные металлы, то *семивалентные* – типичные неметаллы (галогиды). Промежуточные по валентности элементы, например, из группы *четырёхвалентных* (углерод *C* и кремний *Si*) – "стоят" на распутье между металлами и неметаллами. Д.И. Менделеев в соответствии с данными истории науки и техники обратил свое пристальное внимание на резко отличающиеся свойства *одновалентных* щелочных металлов (натрия *Na*, калия *K*, лития *Li*) и *семивалентных* галогидных неметаллов (хлора *Cl*, фтора *F*, брома *Br*). Все галогиды были электроотрицательными атомами, а щелочные металлы – электроположительными атомами. Идя по пути таких сопоставлений химических элементов, выдающийся русский ученый Д.И. Менделеев пришел к важному выводу о том, что существует естественная последовательность элементов, характеризующаяся тем, что в ней при переходе от одного сорта атомов к другому свойства атомов изменяются строго закономерно. Поэтому он в 1869 году весьма обоснованно заключил [3, 7]: "*Элементы, расположенные по величине их атомного веса, представляют явственную периодичность их свойств. Сопоставление элементов по величине атомного веса соответствует атомности (валентности) их и, до некоторой степени, различию химического характера, что видно ясно в ряде литий *Li*, бериллий *Be*, бор *B*, углерод *C*, азот *N*, кислород *O*, фтор *F* и повторяется в других рядах*". Такой исторически была первая словесная формулировка открытого нашим бывшим соотечественником Д.И. Менделеевым *великого периодического закона*, ставшего важнейшим законом природы и сыгравшего фундаментальную роль в развитии мировой химии, атомной и ядерной физики.

В качестве более доступного для многих комментария к этому закону следует сказать, что сущность открытого Д.И. Менделеевым периодического закона атомов химических элементов заключается в том, что в естественной последовательности элементов, расположенных по мере изменения (как правило, по мере возрастания) величины их атомного веса, свойства одних элементов периодически повторяют свойства других, отличаясь от них лишь степенью проявления этих свойств. Эта периодическая повторяемость свойств атомов в естественной последовательности химических элементов и есть основной закон атомов [3, 7]. Д.И. Менделеев открытый им закон в области физической химии назвал периодическим законом, а естественную последовательность химических элементов – *периодической системой элементов* [7]. Так обобщение русским ученым трех главных достижений химической науки за все ее предшествующее существование (напомним, что это – учение об химических элементах, учение об атомах и учение о валентности атомов) и привело его к открытию этого великого закона химии и физики.

Первый вариант периодической системы хими-

ческих элементов (рис. 2) Д.И. Менделеевым был завершен 1 марта 1869 года (по новому стилю) [3, 7]. Эта дата и вошла в историю мировой науки как день открытия *периодического закона Менделеева*.

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		Ti = 50	Zr = 90	? = 180.	
		V = 51	Nb = 94	Ta = 182	
		Cr = 52	Mo = 96	W = 186.	
		Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4.	
		Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.	
	Ni = Co = 59	Pt = 106,6	Os = 199.		
H = 1		Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200	
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	U = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sh = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,4	Ba = 137	Pb = 207
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Tb = 118?		

Рис. 2. Первый вариант периодической системы Менделеева

Этот вариант периодической системы химических элементов и был разослан Д.И. Менделеевым многим русским и иностранным ученым в начале марта 1869 года [3, 7]. Первый вариант своей ставшей в скором времени известной таблицы под заглавием "*Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве*" был опечатан на русском (см. рис. 2) и французском языках. Гениальность этого русского ученого проявилась и в том, что он сразу оценил фундаментальное значение своего научного открытия для химической и физической наук. Загадочные знаки вопросов на этой таблице (см. рис. 2) разъяснились на заседании Русского химического общества (РХО), состоявшемся 18 марта 1869 года в г. Петербурге. Д.И. Менделеев из-за болезни не присутствовал на этом историческом заседании РХО. Его научный доклад "*Соотношение химических свойств с атомным весом элементов*" прочел от его имени профессор Петербургского университета Николай Александрович Меншуткин [3,7]. В этом сообщении Д.И. Менделеев изложил историю рассматриваемого им вопроса и те причины, которые побудили его заняться этим важным исследованием. Вот тут-то и узнали присутствующие на заседании РХО то, что открытый Д.И. Менделеевым периодический закон дает возможность [3, 7]: 1) по-новому подойти к изучению известных химических элементов; 2) исправить неверно определенные атомные веса ряда химических элементов; 3) предсказать существование не открытых еще химических элементов. Из периодического закона Менделеева следовало, что если некоторые из членов его естественной последовательности элементов отсутствуют, то это не потому, что они не существуют в природе, а только потому, что они пока еще не открыты учеными. Поэтому Д.И. Менделеев в своей таблице (см. рис. 2) там, где естественная последовательность атомов нарушалась из-за отсутствия

таких неоткрытых пока химических элементов, и оставил пустые места, отмеченные им знаком вопроса. Открытие Д.И. Менделеева выводило науку об атомах вещества из "смутного" периода, оно давало химикам (физикам) возможность проверять и уточнять атомные веса (массы) химических элементов в соответствии с их положением в периодической системе Менделеева. Автор этого фундаментального открытия в скором времени продемонстрировал научному миру эту возможность на примере атома урана *U* (в таблице на рис. 2 этот атом тогда имел атомный вес или атомную массу 116). 15 декабря 1870 года Д.И. Менделеев в докладе на заседании РХО предложил изменить этот атомный вес урана *U* на число 240 (согласно современным уточненным данным этот стабильный радиоактивный элемент имеет атомную массу, равную 238 [12]). Именно атомный вес числом 240, указывал Д.И. Менделеев, ставит уран *U* на свое место в одну группу с родственными ему элементами. С поразительной точностью и отчетливостью Д.И. Менделеев на основе своей таблицы химических элементов сделал еще ряд смелых научных предсказаний относительно неоткрытых пока элементов [3, 7]. *Во-первых*, по его мнению, между кальцием *Ca* с атомным весом (атомной массой) 40 (современное значение 40,08 [12]) и титаном *Ti* с атомным весом 50 (современное значение 47,90 [12]) в группе элемента бора *B* должен находиться недостающий элемент с атомным весом 45. Этот элемент он предлагал назвать экабором (следующим за бором *B*). *Во-вторых*, за кремнием *Si* в его группе должен следовать новый элемент экасилиций с атомным весом 72. *В-третьих*, за алюминием *Al* в его группе должен следовать такой элемент как экаалюминий (следующий за алюминием *Al*) с атомным весом 68. Что касается экабора Менделеева, то он был открыт в 1880 году шведским химиком Л. Нильсеном и назван скандием *Sc* (в честь географической родины его открытия – Скандинавии) с атомным весом 44,10 (современное значение 44,95 [12]). Экаалюминий Менделеева, предсказанный русским ученым в 1872 году, был открыт в 1875 году французским химиком Л. Буабодраном и назван в честь древнего названия Франции (Галлии) – галлием *Ga* с атомным весом 70,0 (современное значение 69,72 [12]). Экасилиций Менделеева был открыт немецким химиком Винклером в 1885 году и назван германием *Ge* (в честь родины открытия – Германии) с атомным весом 72,50 (современное значение 72,59 [12]). Только в 1875 году (через три года после публикации соответствующей статьи Д.И. Менделеева в немецком химическом журнале [3, 7]) иностранные химики обратили серьезное внимание на периодический закон Менделеева. Случай с прогнозируемым русским ученым открытием галлия *Ga* французского ученого Л. Буабодрана показывал, что игнорировать дальше пионерские работы в области физической химии русского ученого-химика Д.И. Менделеева нельзя. Указанные выше открытия новых химических элементов убедительно доказывали научному миру справедливость учения Д.И. Менделеева о периодичности свойств элементов.

Слишком резкий скачок в свойствах атомов при переходе в естественной последовательности химических элементов от фтора *F* к натрию *Na* и от хлора *Cl* к кальцию *Ca* ясно указывали Д.И. Менделееву на существование целой группы пока неизвестных науке

элементов. И действительно, такие химические элементы вскоре были открыты. Так, в 1895 году английский химик В. Рамсэй выделил новый газообразный элемент – гелий *He* с атомным весом 4,0 (современное значение 4,002 [12]), оказавшийся переходным элементом между неметаллами (галоидами) и металлами [3, 7]. Этот химический элемент с нулевой валентностью был совершенно инертен – его атомы не соединялись ни друг с другом, ни с какими-либо иными атомами вещества. За это свойство гелий *He* и получил название "благородного" газа. По прошествии небольшого времени учеными-химиками были открыты новые представители группы "благородных" газов: неон *Ne*, аргон *Ar*, криптон *Kr* и ксенон *Xe*, которые придали периодической системе Менделеева большую стройность и определенную упорядоченность.

Не меньший триумф ожидал Д.И. Менделеева в связи с его другими научными предсказаниями в рядах тяжелых металлов [3, 7]: существование элемента, аналогичного по свойствам теллуру *Te* и с атомным весом большим, чем у висмута *Bi*; существование элемента, схожего по свойствам цезию *Cs*, и элемента, схожего с барием *Ba*, атомные веса которых равны около 210-230; между радиоактивными элементами торием *Th* и ураном *U* следует ожидать существование элемента с атомным весом 235. Поразительно то, что все эти химические элементы были найдены в природе и описаны. Элементом, "аналогичному теллуру *Te*", оказался радиоактивный полоний *Po* (был назван в честь Польши) с атомным весом 209, открытый выдающимися французскими учеными Марией и Пьером Кюри в 1898 году [7, 13]. Элементом, "схожим с цезием *Cs*" и с атомным весом 210-230, оказался выделенный французскими учеными в 1939 году радиоактивный франций *Fr* (был назван в честь Франции) с атомным весом (атомной массой) 223 [3, 7]. Элементом, "схожим с барием *Ba*" и с атомным весом 210-230, оказался впервые выделенный также знаменитыми французскими супругами Кюри в 1898 году радий *Ra* (название этого серебристо-белого радиоактивного металла произошло от латинского слова "*radius*" – "луч" [2]) с атомным весом 226 [7, 13]. И наконец, радиоактивный элемент "между торием *Th* и ураном *U*" был открыт в 1918 году и назван протактинием *Pa* с атомным весом 231 [3, 7]. Приведенные выше тяжелые металлы, существование которых вытекало из периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева, обладали новым свойством радиоактивности и изучение в дальнейшем их физико-химических свойств оказало огромное влияние на развитие мировой науки и техники.

Имело ли открытие предсказанных Д.И. Менделеевым на основе периодического закона новых химических элементов чисто электротехническое значение? Да, имело. Когда в 20-х годах минувшего столетия для развития электротехники потребовались новые материалы с техническими характеристиками, превосходящими свойства металла вольфрам *W*, то данный закон подсказал специалистам, что искать такой металл необходимо в одной группе с марганцем *Mn*. В 1925 году такой элемент был открыт немецкой четой Вальтером и Идой Ноддак и назван рением *Re* [3, 7]. Из него действительно получались превосходные нити для электрических лампочек накаливания.

Когда к концу 19-го столетия подтвердились

многие научные предсказания Д.И. Менделеева о новых неоткрытых химических элементах и весь научный мир громко "заговорил" о периодическом законе, то замалчивать великое открытие русского ученого было уже просто невозможно. Вот тогда-то западные "мудрецы" от науки стали делать любые попытки и шаги, чтобы отобрать (нагло украсть) у Д.И. Менделеева приоритет и славу первооткрывателя периодического закона, а у России – право называться родиной великого научного открытия. Так, во Франции вспомнили, что в 1863 году их геолог Б. Шанкуртуа сообщил Парижской Академии наук о своей попытке расположить химические элементы в определенном порядке по спиральной линии, намотанной на боковой поверхности цилиндра [3]. По Шанкуртуа получалось, что химические элементы со схожими свойствами должны располагаться через каждые 16 мест. Автор этого предложения не смог объяснить французским ученым причины такого размещения элементов и тех преимуществ, которые дает его "система" элементов для химической науки. Поэтому сообщение Б. Шанкуртуа даже не было опубликовано в научных трудах французской академии. Его просто отправили в архив. В 1869 году это сообщение французскими учеными было извлечено из академического архива и использовано для доказательства того, что вовсе не русский ученый-химик Д.И. Менделеев открыл периодический закон, а француз Б. Шанкуртуа. Английские ученые-химики также припомнили доклад в 1866 году своего соотечественника Дж. Ньюлэнда в Английском химическом обществе (АХО). В этом докладе молодой английский ученый сообщал о замеченной им повторяемости свойств химических элементов через каждые восемь мест, если располагать их в порядке возрастания атомного веса [3]. Некоторые участки таблицы химических элементов Дж. Ньюлэнда были похожи на соответствующие участки периодической системы элементов Д.И. Менделеева (см. рис. 2). Ошибок в таблице Дж. Ньюлэнда было так много, что ему было отказано в печати его доклада в научных трудах АХО. Тем не менее, это не помешало англичанам в 1882 году провозгласить Дж. Ньюлэнда, а не Д.И. Менделеева автором периодического закона атомов. В Германии в 1880 году, когда значение великого открытия Д.И. Менделеева стало общепризнанным, вспомнили о рукописи немецкого профессора Л. Мейера, написанной якобы им в 1868 году и напечатанной в 1870 году (через год после появления в немецком журнале соответствующей статьи Д.И. Менделеева [3, 7]). Таблица химических элементов Л. Мейера довольно близко напоминала таблицу периодической системы элементов Д.И. Менделеева (см. рис. 2). Сам Л. Мейер в своей статье был неуверен в работоспособности его таблицы элементов и просил ученых не придавать ей большого значения. Данные истории науки и техники говорят о том, что именно из-за такого заявления немецкого ученого Л. Мейера в западной Европе и затормозилось признание периодического закона химических элементов, открытого в России [3, 7]. Несмотря на это обстоятельство, немецкие научные круги стали объявлять Л. Мейера творцом данного закона. Архивные исторические материалы свидетельствуют о том, что Д.И. Менделеев не гнался за личной славой первооткрывателя этого великого закона природы. Но примириться с попытками

отобразить у России приоритет открытия периодического закона атомов он не мог. В 1906 году незадолго до своей кончины Д.И. Менделеев по поводу периодического закона элементов написал [3, 7]: "Увидев периодический закон, я со своей стороны в 1869–1871 годах вывел из него такие логические следствия, которые могли показать – верен ли он или нет. К числу их относится предсказание свойств неоткрытых элементов и исправление атомных весов многих, мало в то время обследованных элементов. Без такого способа испытаний не может утвердиться ни один закон природы. Ни Б. Шанкуртуа, которому французы приписывают право на открытие периодического закона, ни Дж. Ньюлэндс, которого выставляют англичане, ни Л. Мейер, которого цитировали иные как основателя периодического закона, не рисковали предугадать свойства неоткрытых элементов, изменить принятые атомные веса атомов и вообще считать периодический закон новым, строго поставленным законом природы, могущим обхватывать еще доселе не обобщенные факты, как это сделано мной с самого начала в 1869 году".

Периодический закон химических элементов, касающийся основ природы и раскрывающий самые глубокие ее тайны, выдержал длительное испытание временем. Последующие успехи мировой науки в 20-ом столетии в области атомной и ядерной физики полностью подтвердили то, что этот закон является фундаментальным законом материи. Со времени его открытия учеными мира было найдено в природе свыше 40 новых химических элементов с самыми разнообразными физико-химическими свойствами. Периодическая система элементов служила и служит в настоящее время руководящей научной "нитью" при открытии новых трансурановых элементов. Новая современная формулировка периодического закона, говорящая о том, что свойства химических элементов являются периодической функцией величины положительного **электрического заряда ядра атомов**, не внесла никаких принципиальных изменений в знаменитую таблицу периодической системы элементов. Мировое научное сообщество, в конце концов, признало, что данный закон является периодическим законом выдающегося русского ученого Д.И. Менделеева [7, 12]. В знак этого признания американские ученые после открытия ими в 1955 году химического элемента под номером 101 назвали его менделевием *Md* и заявили, что ими это сделано "в знак признания пионерской роли великого русского химика Дмитрия Менделеева, который первым использовал периодическую систему для предсказания химических свойств еще не открытых элементов – принцип, который послужил ключом к открытию последних" [7].

Поэтому подытоживая представленную выше краткую занимательную историю великого научного открытия человечества можно заключить, что периодический закон химических элементов оказался не только основой научной систематики различных атомов вещества (да и их химических соединений), но и научным "ключом" к познанию безграничных тайн устройства атомов (молекул) материи природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климов А.А. Большая книга знаний. – Харьков: Веста, 2010. – 160 с.
2. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
3. Степанов Б. История великого закона. – М.: Молодая гвардия, 1952. – 327 с.
4. Выдающиеся физики мира. Рекомендательный указатель / Научн. ред. Б.Г. Кузнецов. – М.: Типография Б-ки им. В.И. Ленина, 1958. – 436 с.
5. Баранов М.И. Майкл Фарадей и его научные заслуги перед человечеством // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 6. – С. 5-12.
6. Скляренко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.
7. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
8. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
9. Бутлеров А.М. Избранные работы по органической химии. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 688 с.
10. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
11. Баранов М.И. Электроны и земная цивилизация // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 5. – С. 3-12.
12. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
13. Кюри Е. Мария Кюри / Пер. с франц. – М.: Атомиздат, 1979. – 320 с.

Bibliography (transliterated): 1. Klimov A.A. Bolshaja kniga znani'. – Harkov: Vesta, 2010. – 160 s. 2. Bolsho' illjustririvann'i' clovar inostrann'ih clov. – M.: Rucckie clovari, 2004. – 957 s. 3. Stepanov B. Istoriija velikogo zakona. – M.: Molodaja gvardija, 1952. – 327 s. 4. V'ida-juschiecia fiziki mira. Rekomendateln'i' ukazatel' / Nauchn. red. B.G. Kuznetsov. – M.: Tipografija B-ki im. V.I. Lenina, 1958. – 436 s. 5. Baranov M.I. Ma'kl Farade' i ego nauchn'ie zaclugi pered chelovechectvom // Elektrotehnika i elektromehaniika. – 2009. – № 6. – С. 5-12. 6. Ckljarenko V.M., Cjadro V.V. Otkr'itija i izobretenija. – Harkov: Vesta, 2009. – 144 s. 7. Kudrjajtsev P.C. Kurc iclorii fiziki. – M.: Procveschenie, 1974. – 312 s. 8. Baranov M.I. Izbrann'ie voproc'i elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i v'ida-juschiecia fiziki mira. – Harkov: Izd-vo NTU "HPI", 2008. – 252 s. 9. Butlerov A.M. Izbrann'ie robot'i po organichecko' himii. – M.: Izd-vo AN CCCR, 1951. – 688 s. 10. JAvorcki' B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike. – M.: Nauka, 1990. – 624 s. 11. Baranov M.I. Elektron'i i zemnaja tsivilizatsija // Elektrotehnika i elektromehaniika. – 2009. – № 5. – С. 3-12. 12. Kuzmichev V.E. Zakon'i i formul'i fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovcki'. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 13. Kjuri E. Marija Kjuri / Per. c frants.– M.: Atomizdat, 1979. – 320 s.

Поступила 30.11.2010

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.
НИПКИ "Молния"
Национального технического университета
"Харьковский политехнический институт"
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47
тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov
An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 1: discovery of periodic law of chemical elements.

A brief outline from the history of discovery of the basic fundamental law of nature, Mendeleev law, that reveals essential intrinsic secrets of the universe, is given.

Key words – outline, history, periodic law, chemical elements.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ. ЧЕРЕЗ ТЕРНИИ К ЗВЕЗДАМ

У статті наведено короткий історичний нарис, присвячений створенню перших електромагнітних реле.

В статті приведено короткий історичний очерк, посвященный созданию первых электромагнитных реле.

Живя в эпоху информационных технологий, уже невозможно себе представить ни дня без таких привычных средств общения, как мобильный и "обычный" телефоны, электронная почта, Internet. Также трудно себе представить и электрическую цепь без применения реле. А ведь еще до изобретения реле как неотъемлемой части телеграфа (а было это совсем недавно – в конце концов, что такое для истории какие-то две сотни лет!) лучшие умы человечества ломали головы над изобретением способов передачи информации на расстояние. Так, например, первая идея о быстрой передаче информации на более или менее приличное расстояние датируется концом XVIII в. В 1789 г. французский подданный Клод Шапп (*Claude Chappe*) (рис. 1) предложил правительству своей страны покрыть территорию Франции сетью башен с размещенными на них специальными устройствами, которые состоят из планок, хорошо видимых с большого расстояния (рис. 2). Это была система так называемого оптического телеграфа или семафора [1].



Рис. 1. Клод Шапп (1763-1805)

В темное время суток на планках зажигались фонари. В каждой башне (рис. 3) сидел человек – телеграфист, в чьи обязанности входило менять расположение планок, ориентируясь на такую же башню, расположенную в пределах его видимости. Телеграфист, получавший сигнал в следующей башне, максимально точно воспроизводил его уже на своей башне, и таким образом сообщение шло по цепочке от "отправителя" до "адресата".



Рис. 2. Башни оптического телеграфа К. Шаппа

Российский словарь 1818 г. описывал оптический телеграф следующим образом: "Машина, устроенная на возвышении, через которую посредством разных знаков можно извещать о том, что происходит". Содержание послания было зашифровано, а шифры, используемые в телеграфе К. Шаппа, были собраны в специальной тетради, на каждой из 92 страниц которой располагалось одинаковое количество слов. Телеграфист передавал номер страницы и номер слова. Как правило, телеграфисты на промежуточных станциях, не знали шифра и просто передавали комбинации на соседние башни.

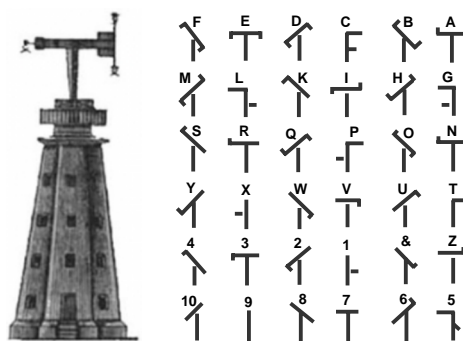


Рис. 3. Комбинации символов оптического телеграфа

Изобретя данный способ передачи данных, К. Шапп представил в 1792 г. описание своего метода национальному собранию, по распоряжению которого была сооружена в 1793-1794 гг. первая линия оптического телеграфа между городами Париж и Лилль общей длиной 225 км. В перспективе планировалось соорудить 22 станции, провести комплектацию и обучение обслуживающего персонала. Следует отметить, что работники получали 25 су в день (например, максимальная цена листового табака составляла 20 су за фунт, курительного табака – 10 су, соли – 2 су, мыла – 25 су), однако могли легко попасть в тюрьму за халатное отношение к делу.

Скорость передачи информации по описанному методу для того времени была очень высокой. Так, по линии оптического телеграфа между г. Петербургом и г. Варшавой (1031 км) в хорошую погоду сообщение шло 45 минут. И все казалось было хорошо – К. Шапп получил звание телеграфного инженера, был назначен директором французских телеграфных линий, строились новые семафорные башни, телеграфные линии, но...

...пришла эра электромагнетизма. В 1820 г. датский ученый Ханс Христиан Эрстед (*Hans Christian Ørsted*) (рис. 4) провел свой знаменитый опыт по нагреву проволоки от вольтова столба и отклоняющейся во время замыкания гальванической цепи стрелкой компаса. Таким образом, была установлена взаимосвязь между электричеством и магнетизмом.



Рис. 4. Х. Эрстед (1777-1851) и его знаменитый эксперимент

Сразу же после опубликования опытов Х. Эрстеда, немецкий ученый Й. Швейггер (*Johann Salomo Christoph Schweigger*) изобрел многовитковую катушку или так называемый "множитель магнитного поля" (*galvanic multiplier*), который позволил значительно увеличить магнитную мощность электрической цепи. Множитель Й. Швейггера, снабженный магнитной стрелкой, стал первым прибором для измерения электричества – гальванометром.

Развивая идеи предшественников, французский физик А. Ампер (*Andre-Marie Ampere*) первым предложил в 1821 г. систему электромагнитного телеграфа, в которой каждая буква (или цифра) передавалась по отдельной электрической цепи и визуально фиксировалась по отклонению подвешенной магнитной стрелки. По сути, каждая цепь стрелочного телеграфа А. Ампера представляла собой не что иное, как первое электрически управляемое с помощью проводов электромеханическое устройство скачкообразного действия, выходом которого являлась магнитная стрелка, устойчиво занимающая две позиции. В первой позиции при обесточенной обмотке стрелка была ориентирована согласно внешнему магнитному полю. Во вторую позицию магнитная стрелка переходила, быстро поворачиваясь, под влиянием магнитного поля обмотки, возникающего при протекании по ней тока. После отключения цепи стрелка возвращалась в первоначальное стабильное состояние уже под воздействием системы возврата – внешнего магнитного поля Земли и упругих сил подвеса. Таким образом, стрелочный телеграф А. Ампера приближенно уже напоминал пусть не конструкцию, но хотя бы принцип действия современных реле.

Практическое применение идеи телеграфа А. Ампера получили и в России, где русский ученый П.Л. Шиллинг в 1832 г. построил и продемонстрировал на практике первый в истории электромагнитный телеграф для связи Зимнего дворца и Министерства путей сообщения, для чего им же был изобретен специальный телеграфный код, требующий всего шести магнитных стрелок. Эти стрелки для повышения чувствительности (или, иными словами, увеличения дальности связи) устанавливались на шелковом подвесе внутри обмоток. Система П. Шиллинга настраивалась таким образом, чтобы при отсутствии тока в обмотке закрепленный на подвесе тонкий бумажный диск находился к наблюдателю торцевой стороной, а при пропускании тока той или иной полярности данный диск поворачивался к наблюдателю уже определенной стороной, окрашенной в разный цвет.

Созданию же первой, можно сказать, классической, конструкции реле предшествовало изобретение в 1824 г. англичанином В. Старджемом (*William Sturgeon*) (рис. 5) электромагнита – устройства, преобразующего входной электрический ток проволоочной катушки, намотанной на железный намагничивающийся сердечник, в магнитное поле, образующееся внутри и вне данного сердечника. Магнитное поле "обнаруживалось" благодаря своему воздействию на ферромагнитный материал, расположенный вблизи сердечника. Этот материал собственно и притягивался к сердечнику электромагнита. Оригинальный рисунок В. Старджена (рис. 5, справа) с описанием конструкции и принципа работы его электромагнита был приведен в письме 1824 г. к Британскому Королевскому обществу искусств, производств и торговли (*British Royal Society of Arts, Manufactures, and Commerce*).

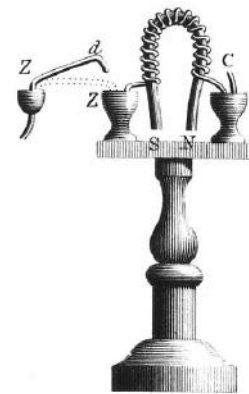


Рис. 5. В. Старджен (1783-1850) и конструкция его электромагнита

Электромагнит В. Старджена состоял из подковообразного железного сердечника длиной 30 см и диаметром 1,3 см, на который было намотано 18 витков неизолированного медного провода (изолированных проводов в то время еще попросту не существовало, поэтому витки не должны были касаться друг друга!). Для изоляции же обмотки непосредственно сам сердечник покрывался лаком [2].

Когда ток протекал по обмотке, создавалось магнитное поле, сердечник намагничивался и притягивал всевозможные железные детали. Когда обмотка обесточивалась, намагниченность сердечника исчезала. "Ну и что?! Ничего особенного и необычного!" – скажем мы. Но... сам электромагнит В. Старджена весил около 200 грамм, и впервые в истории при питании от одной батареи был способен поднять груз, превосходящий свой собственный вес (приблизительно в 20 раз (!)) – около 4 кг. Таким образом, с помощью электромагнита В. Старджен впервые в истории продемонстрировал преобразование электрической энергии в полезную механическую работу.

Электромагнит В. Старджена был выставлен все в том же Британском Королевском обществе искусств, производств и торговли, находящемся в г. Лондоне, в 1825 г., за который, кстати, изобретатель получил от данной организации серебряную медаль (рис. 6, слева).

На родине В. Старджена в небольшом английском городке Виттингтон (*Whittington*) установлена мемориальная доска в честь В. Старджена, "изобретателя и самого знаменитого сына Виттингтона" (рис. 6, справа).



Рис. 6.

Однако электромагнит В. Старджена был все-таки достаточно "слабым", так как применение в его конструкции неизолированного медного провода ограничивало количество витков, которое возможно было разместить на сердечнике. Может именно по данной причине автору изобретения досталась "всего лишь" серебряная медаль.

Впоследствии эффект преобразования энергии электрического тока в механическую энергию по перемещению детали из ферромагнитного материала (якоря) лег в основу различных электромеханических устройств электросвязи (телеграфии и телефонии), электротехники, электроэнергетики.

Одним из первых таких устройств было электромагнитное реле (рис. 7), изобретенное американским ученым Дж. Генри (*Joseph Henry*) (рис. 8) в 1831 г. Однако необходимо отметить, что данное реле представляло собой не совсем коммутационный аппарат – электрический ток от внешнего источника после преобразования электромагнитом 1 данного реле в магнитное поле приводил в движение подвижный якорь 2, который, перемещаясь, ударял по корпусу металлического колокола 3, вызывая звуковой сигнал.

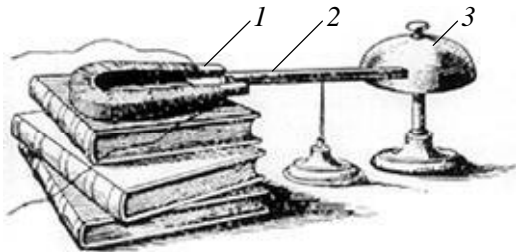


Рис. 7. Электромагнитный звуковой телеграф Дж. Генри

Также Дж. Генри сделал значительный вклад в развитие непосредственно электромагнитов постоянного тока. Начиная с 1827 г., он в течение нескольких лет вел постоянные усовершенствования электромагнитов, результатом которых стали следующие достижения.

Дж. Генри был первым, кто использовал для обмотки электромагнита медный провод с изоляцией, в качестве которой служила обычная шелковая нить (которую, кстати, он наматывал сам, беря ее со свадебного платья своей жены! [3]). Применение данной концепции позволило Дж. Генри создать самый мощный в то время электромагнит ("*Yale magnet*" или "*Big magnet*") под руководством Б. Силлимана (*Benjamin Silliman*), профессора Йельского университета, редактора журнала "*American Journal of Science*", в котором, кстати, и вышла публикация с описанием новой разработки в 1831 г. О данном электромагните речь пойдет ниже.

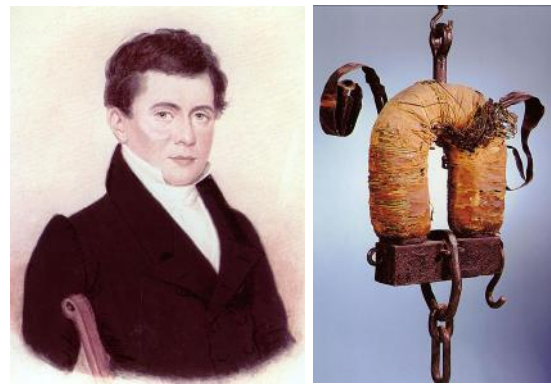


Рис. 8. Дж. Генри (1797-1878) и его знаменитый "*Yale magnet*"

Также Дж. Генри разработал так называемые "уплотненные" (многовитковые) электромагниты – на относительно небольшой площади электромагнита ему удалось расположить до 400 витков медной проволоки (общая длина проволоки составила 10,6 м), изолированной шелком. Также он заметил, что если соединять данные обмотки параллельно, то результирующая сила тока заметно увеличится.

К изобретениям Дж. Генри также относится так называемая "многокатушечная" обмотка, которая позволила существенно увеличить подъемную силу электромагнита. Дж. Генри предложил размещать на электромагните до десяти таких обмоток – так появились первые в мире технические образцы катушек ("бобины"). При проведении многочисленных экспериментов (рис. 9) Дж. Генри изменял количество катушек и схемы их подключения к гальваническим батареям, в результате чего сумел создать конструкции электромагнитов с фантастической (даже на сегодняшний день!) подъемной силой – до 325 кг (!). И это при собственном весе электромагнита в 10 кг! А что уже говорить о следующем "богатыре"! По данным [2] Дж. Генри удалось разработать электромагнит, сердечник (*core*) которого весил 27 кг, а сила удержания составила беспрецедентных 935 кг! Очевидно (для нас, конечно!), что никаких фокусов здесь нет – все дело в значении тока обмотки и в применяемых для изготовления электромагнита материалах. Но давайте вспомним дату проведения работ Дж. Генри, просто закроем глаза и насладимся великолепной музыкой – 935 кг...

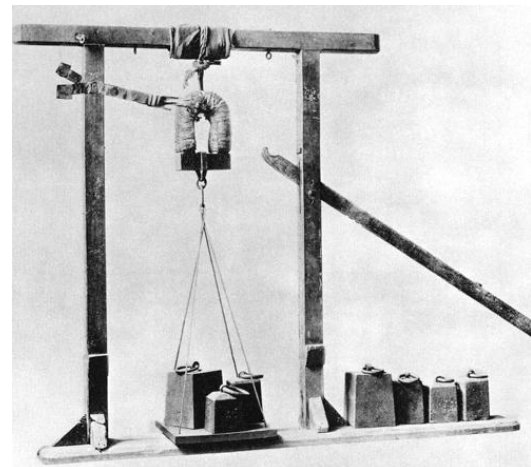


Рис. 9. Знаменитый "*Yale magnet*" Дж. Генри, установленный для проведения экспериментов на раме

При проведении экспериментов Дж. Генри работал по двум направлениям. Соединяя несколько обмоток параллельно и подключая их к одному гальваническому элементу, он демонстрировал электромагнит с малым активным сопротивлением и большим током в обмотке; при включении же обмоток последовательно – высокочувствительный электромагнит для последовательно соединенных источников питания. Первый вариант конструкции Дж. Генри предлагал использовать для силовых электромагнитов, которые применялись при небольших расстояниях от источника тока (рис. 10, слева), второй – для электромагнитов, реагирующих на слабые сигналы при удаленном источнике (рис. 10, справа) [4].

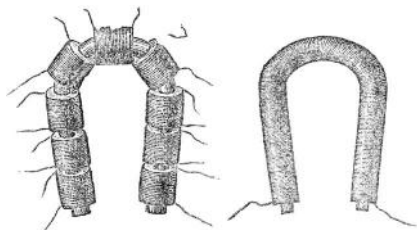


Рис. 10. Варианты соединения обмоток в электромагнитах, предложенные Дж. Генри

Именно второй вариант электромагнита с внешним якорем послужил основой конструкции первого "настоящего" коммутационного реле, который был применен в 1837 г. в телеграфном аппарате американского художника и изобретателя С. Морзе (*Samuel Finley Breese Morse*) (рис. 11), создавшим позднее к нему и собственный код – известную азбуку Морзе.



Рис. 11. Сэмюэл Финли Бриз Морзе (1791-1872) и его телеграф

В области электротехники С. Морзе не обладал достаточными знаниями. Достаточно сказать, что до 41 года он занимался исключительно живописью (был довольно известным портретистом), не считая нескольких лекций по электричеству, посещенных им во время обучения еще в Ельском университете. Так, например, С. Морзе ошибочно полагал, что до него созданием электромагнитного телеграфа никто в мире не занимался [5].

В 1836 г. С. Морзе сконструировал прототип телеграфа, в основе которого лежал электромагнит В. Старджена с обмоткой, подключенной только к одной батарее. Такой "телеграф" оказался работоспособным, но передавал сигналы лишь на расстояние ... в 12 м. Самостоятельно улучшить характеристики устройства С. Морзе не удалось, и он обратился за помощью к Л. Гейлу (*Leonard Gale*), профессору химии (!) Нью-Йоркского университета, в котором С. Морзе преподавал живопись. Ознакомившись с прототипом, Л. Гейл рекомендовал использовать вместо электромагнита В. Старджена высокочувствительный электромагнит Дж. Генри с одновременным использованием нескольких последовательно соединенных источников питания [2]. Л. Гейл также убедил (!) С. Мор-

зе прочитать уже упоминавшуюся статью Дж. Генри 1831 г. в журнале *"American Journal of Science"*, в которой описывались достижения в данной области. Примененные батареи из двадцати последовательно соединенных элементов и электромагнит с несколькими сотнями витков, С. Морзе и Л. Гейл смогли увеличить первоначальное расстояние для передачи сообщений (12 м) более чем в 1300 раз – до 16 км!

Применение в телеграфе С. Морзе высокочувствительного реле Дж. Генри позволило создавать так называемые усилители телеграфных сигналов. С помощью данных реле, которые устанавливались в конце каждого отдельного участка линии связи, подключалась батарея, питающая следующий участок линии. Применение таких усилителей позволило значительно увеличить протяженность телеграфных линий.

Усиление "ослабленного" тока с помощью электромеханического устройства Дж. Генри напоминало смену (англ. *relay*) уставших почтовых лошадей на придорожных станциях (фр. *relais*). Такая необычная аналогия и послужила основой названия одного из самых распространенных, с одной стороны – простых, ничем не примечательных и, можно сказать, обыденных, но с другой стороны – конструктивно сложных, надежных и удивительных электрических аппаратов – реле. До недавнего времени реле в основном применялись в телефонно-телеграфной области, но с началом использования в данной сфере цифровых устройств начался резкий спад производства реле. Но, несмотря на такие "тернии", в последние годы наметилась тенденция к росту выпуска реле, в основном электромагнитных, что дает надежду на "звездное" возвращение реле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронный ресурс: http://en.wikipedia.org/wiki/Claude_Chappe.
2. Sherman Roger. Joseph Henry's Contributions to the Electromagnet and the Electric Motor / National Museum of American History. Электронный ресурс: <http://siarchives.si.edu>.
3. Электронный ресурс: <http://www.electrolibrary.info/history/genry.htm>.
4. Электронный ресурс: http://etcweb.princeton.edu/CampusWWW/Companion/henry_joseph.html.
5. Быховский М.А. Гениальные дилетанты и их выдающаяся роль в развитии электросвязи. Электронный ресурс: <http://www.bykhmark.ru/eng/page.php?trid=364>.

Bibliography (transliterated): 1. Elektronn'i' recurc: http://en.wikipedia.org/wiki/Claude_Chappe. 2. Sherman Roger. Joseph Henry's Contributions to the Electromagnet and the Electric Motor / National Museum of American History. Elektronn'i' recurc: <http://siarchives.si.edu>. 3. Elektronn'i' recurc: <http://www.electrolibrary.info/history/genry.htm>. 4. Elektronn'i' recurc: http://etcweb.princeton.edu/CampusWWW/Companion/henry_joseph.html. 5. B'ihovcki' M.A. Genialn'e diletant'i i ih v'idajuschajaja rol v razvitii elektrocvjazi. Elektronn'i' recurc: <http://www.bykhmark.ru/eng/page.php?trid=364>.

Поступила 17.01.2011

Гречко Александр Михайлович, к.т.н.

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

A.M. Grechko

Electromagnetic relays. Per aspera ad astra.

The article gives a historical review devoted to creation of first electromagnetic relays.

Key words – relay, electromagnet, inventor.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ

У статті розглянуті різні моделі конвекційного відводу тепла від нагрітого тіла. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів та наведені кількісні оцінки отриманих результатів.

В статье рассмотрены различные модели конвективной отдачи тепла нагреваемым объектом. Проведен сравнительный анализ полученных результатов и даны количественные результаты расчётов.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что степень нагрева электротехнических объектов в значительной мере определяет долговечность и надежность их работы, поэтому, при проектировании таких объектов необходимо как можно более точно и достоверно оценивать значения температуры нагрева. Кроме того, в процессе эксплуатации, не всегда возможно непосредственное измерение температуры интересующей части установки и оценку приходится производить по косвенным параметрам. В этих случаях определяющую роль в оценке температур нагрева объектов играют математические модели, описывающие процессы теплопередачи. Одной из наиболее сложных математических моделей является модель свободной конвективной отдачи тепла от нагреваемого тела. Ввиду сложности решения данной задачи, в литературе [2-4] предлагается использовать ряд упрощенных методов расчета коэффициента теплоотдачи с поверхности. Целью данной статьи является сравнительный анализ значений коэффициентов теплоотдачи с поверхности и температур нагрева электромагнита броневого типа, полученных на основании различных методов расчета конвективного теплоотвода.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Постановку задачи можно сформулировать следующим образом: "Определить среднюю объёмную температуру нагрева и действительные коэффициенты теплоотдачи с поверхности в воздушной среде при различном способе расчета теплоотвода в конечном положении якоря и установившемся режиме работы электромагнитного механизма, установленного на теплоизолированном основании".

Вид рассчитываемого электромагнита в осесимметричной системе координат с условиями теплоотдачи на внешней поверхности показан на рис. 1. При этом предполагается, что воздушные объёмы, показанные на рис. 1 не сообщаются с внешним пространством и теплопередача в них происходит исключительно за счет теплопроводности. Это предположение в значительной мере оправдано, т. к. зазор между якорем и корпусом невелик, а внутренние поверхности якоря и корпуса имеют одинаковую температуру за счет высокого коэффициента теплопроводности материала корпуса. Поэтому циркуляция воздуха в этом пространстве практически отсутствует [2, 3] (теплопередача в тонких воздушных прослойках). Предполагается, что магнит расположен на теплоизолирующей поверхности.

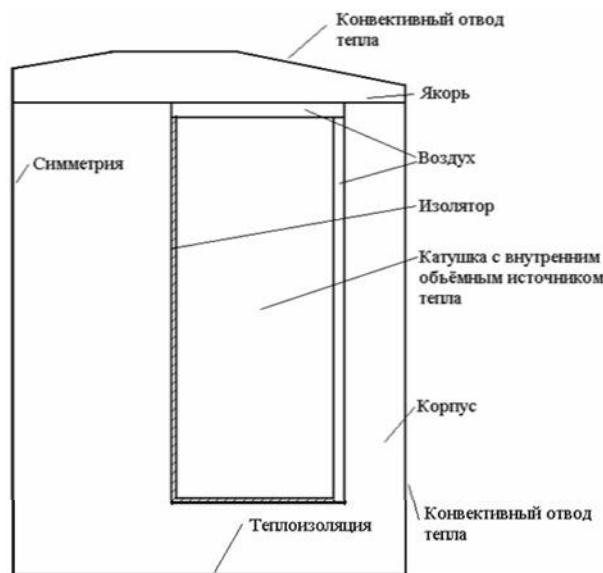


Рис. 1. Расчетная модель электромагнита

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

1. Задание коэффициентов теплоотдачи рассчитанных по упрощенным формулам [3, 4].

В этом случае решалось уравнение теплопроводности в стационарном режиме для модели рис. 1:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)) = -q_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)), \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности соответствующих областей; T – температура; q_0 – мощность объёмных источников тепла катушки при температуре T_0 ; α – температурный коэффициент.

При определении граничных условий будем исходить из следующего [3]: температура нагрева поверхности аппаратов не превышает 100 °С и при естественной конвекции режим движения воздуха определяется как интенсивный ламинарный и локонообразный. В этом случае коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности может быть определен по формуле [3, 4]:

$$k = 1.33 \cdot \left(\frac{T - T_0}{L} \right)^{0.25} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right], \quad (2)$$

где T – температура нагретой поверхности; L – определяющий размер.

В случае если теплоотдающая поверхность направлена вверх, то коэффициент теплоотдачи увеличивается на 30 % [3]. Следовательно, необходимо решить нелинейную задачу по расчету температуры в неоднородной среде с граничными условиями второго и третьего рода, используя уравнения (1, 2). Данная задача решается итерационными методами.

2. Задание коэффициентов теплоотдачи в критериальной форме [2-4].

В этом случае, коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$k = \lambda \cdot \frac{Nu}{L} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right], \quad (3)$$

где k – коэффициент теплоотдачи; λ – теплопроводность воздуха; Nu – критерий Нуссельта; L – определяющий размер.

В свою очередь, критерий Нуссельта является функцией других критериев:

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (4)$$

где $Pr = \mu \cdot g \cdot C_p / \lambda$ – критерий Прандтля, учитывающий вязкость, теплоёмкость и теплопроводность окружающей среды; $Gr = \beta \cdot g \cdot L^3 \cdot (T - T_0) / \nu^2$ – критерий Грасгофа, учитывающий объёмное расширение среды, ее кинематическую вязкость и разность температур между нагретой поверхностью и окружающей средой.

Так как все параметры, входящие в (3) являются функциями температуры, то решение задачи осуществляется на модели рис. 1, с учетом (1, 3, 4). Данная задача решается итерационными методами.

3. Решение задачи конвективного теплообмена на основании уравнений Навье-Стокса. Решение данной задачи проводилось на модели, показанной на рис. 2, где указаны и граничные условия.

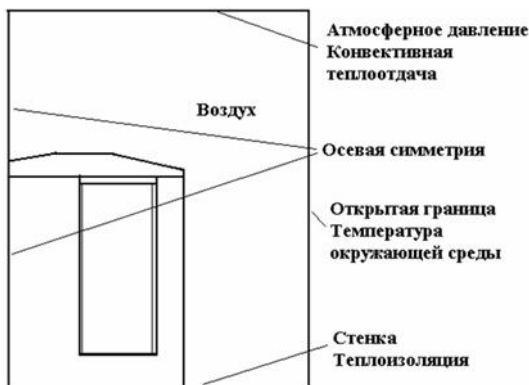


Рис.2. Расчетная модель конвективной теплопередачи

Расчетные уравнения передачи тепла для области занятой телами записаны ранее (1). Для воздушной среды наряду с уравнением теплопроводности в движущейся среде, необходимо записать уравнения движения самой среды. В наиболее компактной и полной форме такие уравнения приведены в [1]. Уравнения движения среды с учетом ее сплошности и объёмных сил (4), должны быть дополнены уравнением теплопроводности с учетом тепловыделения за счет вязкости движущейся среды, а так же уравнением состояния газа (уравнение Менделеева-Клайперона).

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{V}) = 0, \\ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\nabla \times \vec{V}) \times \vec{V} + \nabla \left(\frac{V^2}{2} + U \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \nabla p - \\ - \frac{\chi}{\rho} \cdot \left[\nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \cdot \nabla \cdot (\nabla \vec{V}) \right] = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} c \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \cdot T \right) - \frac{p}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + \\ + \chi \cdot \vec{V} \cdot \left[\nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \cdot \nabla \cdot (\nabla \vec{V}) \right], \\ \frac{p}{\rho} = R \cdot T \end{cases} \quad (5)$$

В системе уравнений (4, 5) теплофизические параметры зависят не только от координаты, но и от температуры. При свободном движении среды в системе (4) будет отсутствовать слагаемое $\nabla p / \rho$, а вместо потенциальной энергии сил тяжести будет присутствовать подъемная сила:

$$\nabla U = \vec{F} = \vec{g}(r, z) \cdot (\rho - \rho_0),$$

где $\vec{g}(r, z) = (0, -9.81) \text{ м/с}^2$.

Так же при свободном движении среды отсутствует слагаемое $(p/\rho) \cdot (\partial \rho / \partial t)$ (отсутствие механической работы, выполняемой средой). В стационарном режиме не учитываем временные изменения параметров. Полученные уравнения позволяют определить все неизвестные функции \vec{V}, p, ρ, T .

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Исходными данными для расчета являются геометрия областей; свойства материалов и значение внутренних источников тепла. Максимальная объемная мощность внутренних источников тепла принималась равной $q_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3$. Размеры магнита: высота – 100 мм; радиус – 77 мм.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Решение поставленных задач, в частности системы (1, 4, 5) с граничными условиями, показанными на рис. 2, представляет очень большие сложности. Все имеющиеся аналитические решения получены для случаев, не имеющих практического значения. Решение задачи возможно только численными методами. Однако сходимость решения плохая и для получения результата требуются специально разработанные методы численного решения. Обойти указанные трудности позволяют современные программные комплексы, позволяющие в приемлемые сроки получить достаточно точные результаты. Решение задачи проводилось в параметрическом режиме

$$q_0 = q_0 \cdot \text{param},$$

где переменная $\text{param} = (0.2; 0.4; 0.6; 0.8, 1)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ коэффициентов теплоотдачи

	Метод		
	1	2	3
$T_c [^\circ K]$	401.50	428.48	450.59
$\varepsilon\%$	-10.9	-4.9	0
$T_{max} [^\circ K]$	406.32	433.55	456.1
$K_h \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$	6.95	6.13	7.14
$K_r \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$	10.23	7.79	1.95

В табл. 1 показаны: средняя и максимальная температура в зависимости от метода расчета теплоотвода и средние значения коэффициентов теплоотдачи с боковой (K_b) и верхней (K_v) поверхностей магнита. Значение мощности внутренних источников тепла максимально.

Как следует из табл. 1, наблюдается существенное различие в определении коэффициента теплоотдачи с верхней поверхности, что связано с малыми скоростями движения среды над верхней поверхностью и малым перепадом температур. На рис.3 показан график распределения температуры по внешней поверхности магнита, начиная от оси симметрии и заканчивая основанием.

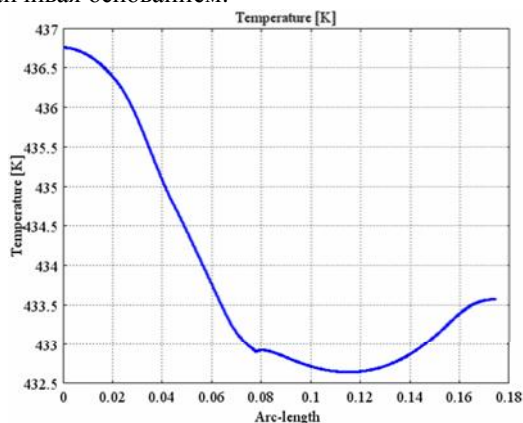


Рис. 3. Распределение температуры по поверхности магнита

Как следует из рис. 3, разность температур по поверхности не превышает 4 градуса, а наивысшая температура наблюдается на верхней поверхности магнита (0 – 0.077) м. Несмотря на такое небольшое различие температур, коэффициенты теплоотдачи для модели, рассчитанной с учетом движущейся среды, существенно различаются по поверхности магнита.

На рис.4 показано значение коэффициента теплоотдачи с поверхности, который рассчитывался:

$$k = \frac{\text{abs}(Q)}{(T - T_0)}, \quad (6)$$

где Q – суммарный тепловой поток, отводимый с поверхности.

Начало отсчета – ось симметрии, мощность внутренних источников зависит от параметра.

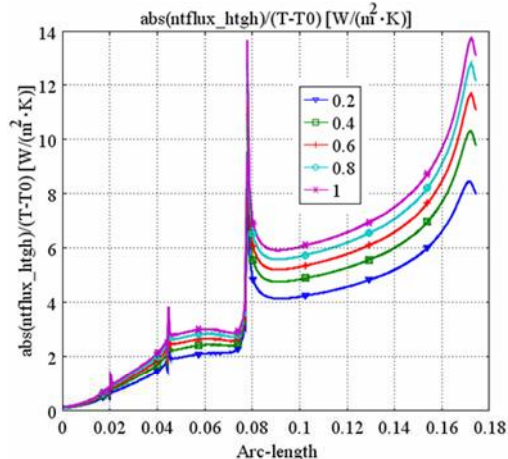


Рис. 4. Распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности магнита

Скачки значения коэффициента рис. 4 связаны с разрывом производной по линии сопряжения поверхностей. На рис.5 приведен график значений температур в плоскости, расположенной в 10мм над поверхностью магнита в зависимости от величины параметра.

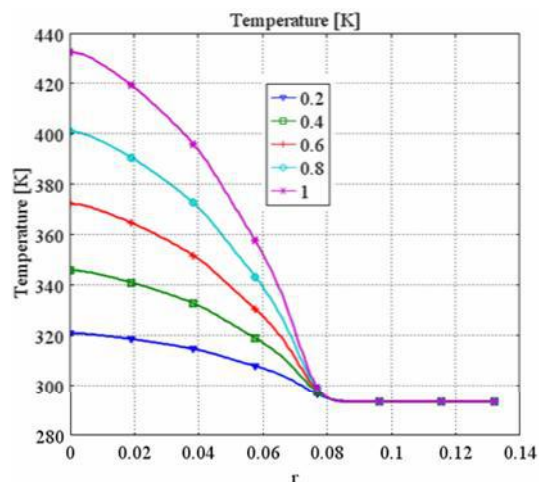


Рис. 5. Распределение температур в плоскости над магнитом в зависимости от мощности внутренних источников тепла

На рис. 6 показано распределение температуры по верхней поверхности магнита. Сравнительный анализ рис. 5, 6 показывает практическое отсутствие перепада температур между верхней поверхностью магнита и охлаждающей средой.

На рис. 7 показано распределение температуры в магните и окружающей среде.

На рис. 8 показано распределение температуры в горизонтальной плоскости среднего сечения магнита в зависимости от мощности внутренних источников тепла. Из графиков следует, что перепад температур от температуры корпуса магнита до температуры окружающей среды на боковой поверхности происходит в тонком пограничном слое. Толщина пограничного слоя на верхней поверхности магнита, как следует из рис. 7, намного больше. На рис. 9 показано распределение скоростей омывающего воздуха в средней плоскости магнита, а на рис. 10 общая картина поля скоростей.

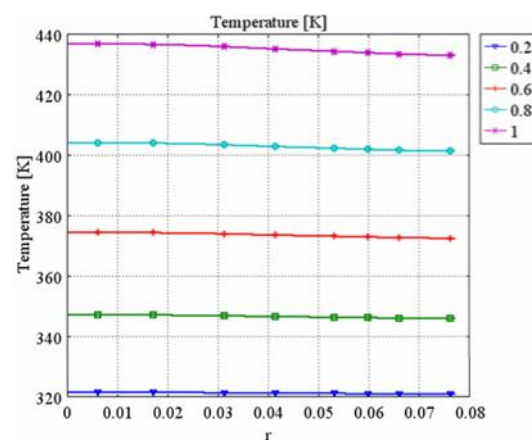


Рис. 6. Температура верхней поверхности магнита в зависимости от мощности внутренних источников тепла

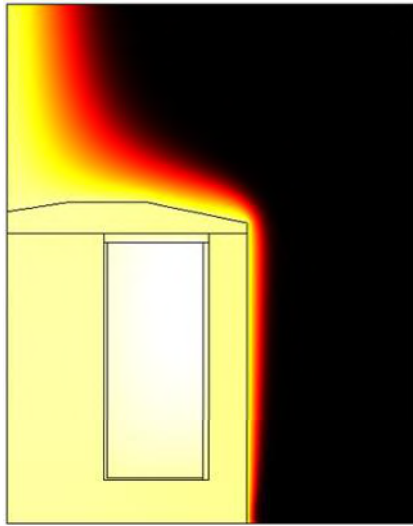


Рис. 7. Распределение температуры

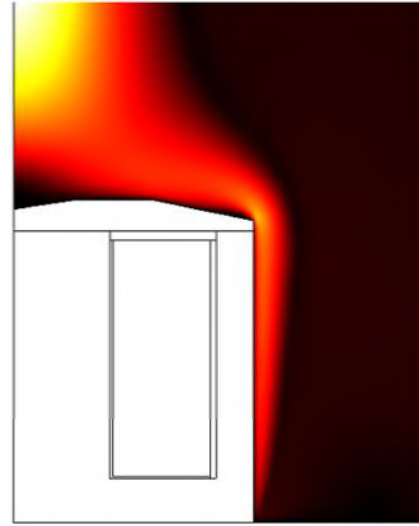


Рис. 10. Поле скоростей омывающей среды

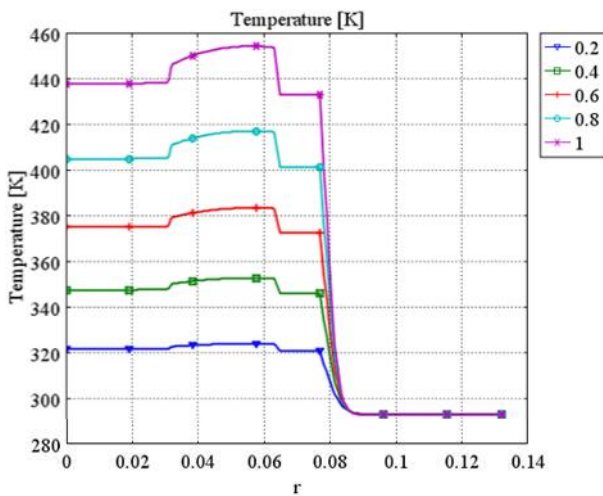


Рис. 8. Распределение температур в среднем сечении магнита и в окружающей среде

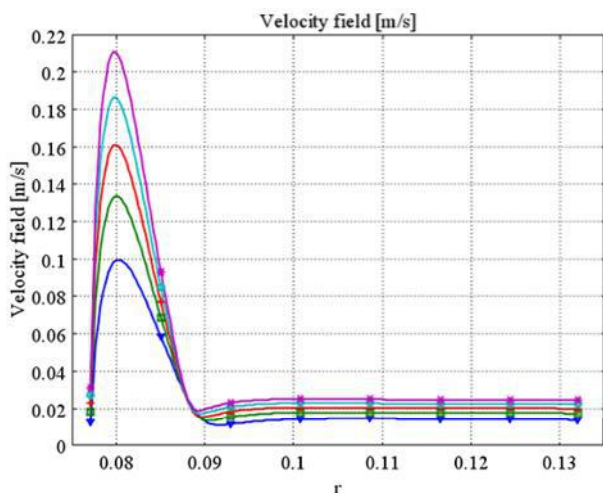


Рис. 9. Распределение скоростей в средней горизонтальной плоскости магнита

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная методика расчета была использована при проектировании электромагнита постоянного тока, работающего в напряженном тепловом режиме. Все данные, полученные расчетным путем, были подтверждены экспериментально, на изготовленном образце электромагнита. Наиболее точные значения температур дает модель 3. Для повышения точности расчета по первой модели, верхнюю поверхность нужно принять теплоизолированной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Я.И. Френкель. Курс теоретической механики. – Л-д.: Красный печатник, 1939. – 435 с.
2. М.Ф. Михеев. Основы теплопередачи. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 391 с.
3. А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. Тепловые расчеты электрических аппаратов. – Л-д.: Энергия, 1967. – 379 с.
4. Г.В. Буткевич, В.Г. Дегтярь, А.Г. Сливинская. Задачник по электрическим аппаратам: Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1987. – 232 с.

Bibliography (transliterated): 1. JA.I. Frenkel. Kurs teoretichecko' mehaniki. - L-d.: Krasn'i' pechatnik, 1939. - 435 c. 2. M.F. Miheev. Osnov'i teploperedachi. - M.: Gocenergoizdat, 1956. - 391 c. 3. A.M. Zalecki', G.A. Kukekov. Teplov'ie racchet'i elektricheckih apparatov. - L-d.: Energija, 1967. - 379 c. 4. G.V. Butkevich, V.G. Degtjar, A.G. Clivinckaja. Zadachnik po elektricheckim apparatam: Uchebnoe pocobie dlja vuzov. M.: V'icshaja shkola, 1987. - 232 c.

Поступила 30.11.2010

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электрические аппараты"
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21
тел. (057) 707-69-76, e-mail: baida@kpi.kharkov.ua

E.I. Bayda

Comparative analysis of convection heat emission models.

In the article, different models of convection heat emission by a heated object are considered. A comparative analysis of results obtained is conducted, quantitative results of calculations given.

Key words – heat emission; mathematical model of free convection; heat emission coefficient; convective heat exchange.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Розроблена математична модель, яка описує тепловий стан індукційно-динамічного двигуна циклічної дії. Для визначення нагріву активних елементів, що змінюються на протязі робочого процесу, використовуються схемна та польова моделі. Встановлено вплив на тепловий стан двигуна режимів неробочого ходу, руху та гальмування якоря. В режимі руху якоря досліджені залежності від частоти слідування імпульсів, висоти якоря, площі охолодження активних елементів та інтенсивності охолодження індуктора. Проведені експериментальні дослідження підтвердили достовірність математичної моделі та результатів розрахунків.

Разработана математическая модель, описывающая тепловое состояние индукционно-динамического двигателя циклического действия. Для определения нагрева активных элементов, изменяемых в течение рабочего процесса, используются схемная и полевая модели. Установлено влияние на тепловое состояние двигателя режимов холостого хода, движения и торможения якоря. В режиме движения якоря исследованы зависимости превышенной температур активных элементов от частоты следования импульсов, высоты якоря, площади охлаждения активных элементов и интенсивности охлаждения индуктора. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили достоверность математической модели и результатов расчетов.

ВВЕДЕНИЕ

Индукционно-динамические двигатели (ИДД) находят широкое применение во многих отраслях науки, техники и технологии. Они используются для горнодобывающей промышленности, очистки технологического оборудования и танкеров от остатков хранимых грузов, испытаний изделий и устройств на ударные воздействия, для обработки и формовки металлических конструкций, в геологоразведке, в магнитно-импульсной сварке, штамповке и иных операциях, используемых в машиностроении [1, 2].

В ИДД неподвижный многовитковый индуктор, возбуждаемый от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), посредством импульсного магнитного поля индуцирует токи в массивном электропроводящем якоре, который под действием электродинамических сил обеспечивает линейное перемещение якоря с ударным элементом, оказывающим силовое воздействие ударного типа на объект деформирования.

В рассматриваемых линейных двигателях возвратно-поступательного движения протекают сложные пространственно-временные, зависящие друг от друга импульсные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы [3, 4].

Во многих технологических системах ИДД должны работать в циклическом режиме, обеспечивая непрерывную последовательность силовых импульсов. В таком двигателе на каждом рабочем цикле реализуется кратковременная фаза нагрузки, при которой в активных элементах (индуктор и якорь) создаются интенсивные токовые импульсы, и продолжительная пауза. Хотя такой режим напоминает повторно-кратковременный с малой ПВ, он обладает существенными особенностями [5]. Импульсная нагрузка столь непродолжительна, что нарастание температуры в активных частях за рабочий период происходит практически в адиабатических условиях. Кроме того, в отличие от повторно-кратковременного режима, в данном случае чаще всего подлежат исследованию:

- нагрев активных элементов, выдерживающих последовательно ряд циклов с известными временными

и нагрузочными характеристиками;

- пауза, в течение которой активные части охлаждаются до наперед заданного состояния;
- допустимое число циклов при заданных длительностях импульса и паузы.

В ИДД циклического действия на первый план выступают тепловые процессы, которые существенно зависят от остальных параметров и процессов, в том числе, от параметров ЕНЭ, индуктора и якоря, от конструктивного выполнения, от частоты следования импульсов, от характера движения якоря и времени его взаимодействия с индуктором, от режима работы и др. Однако до настоящего времени они не исследованы, что можно объяснить сложным и взаимосвязанным характером процессов различной физической природы, которые зависят от конкретного конструктивного выполнения и назначения ИДД.

Целью статьи является установление особенностей тепловых процессов в ИДД циклического действия и основных факторов, оказывающих на них влияние.

КОНСТРУКТИВНАЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМЫ

В качестве объекта исследования выбран ИДД дисковой конфигурации с естественным охлаждением (температура воздуха $T_0 = 20^\circ\text{C}$), и схема возбуждения индуктора серией однополярных аperiodических импульсов, позволяющая использовать ЕНЭ на базе высокоэнергетичных электролитических конденсаторов [6].

ИДД содержит неподвижный индуктор 1 с двухслойной обмоткой, которая намотана прямоугольной медной шиной и уложена в стеклотекстолитовый каркас 2 (рис. 1). Индуктор прикреплен к корпусу 3. Напротив индуктора 1 установлен дисковый якорь 4, который прикреплен к силовой пластине 5. Внутри обмотки индуктора установлена направляющая втулка 6 для обеспечения хода бойка 7, имеющего заостренную часть, упорный выступ 8 и концевую часть 9.

Заостренная часть бойка установлена напротив объекта деформирования 10, фиксированного относительно каркаса 3, концевая часть 9 – установлена в зазоре оптического датчика положения 11, а упорный

выступ 8 взаимодействует с силовой пластиной 5. Возвратная пружина 12, прикрепленная к каркасу 3 и силовой пластине 5, обеспечивает плотное прижатие якоря 3 к индуктору 1 до и после силового импульса. Сверху установлен защитный кожух 13.

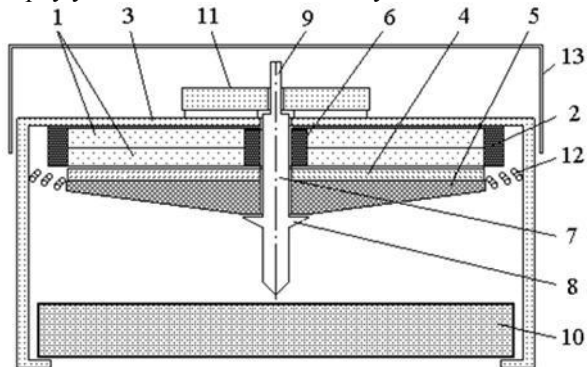


Рис. 1. Схематическое устройство ИДД

Параметры исследуемого ИДД, принятого в качестве базового варианта, представлены в табл.

Таблица

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора, мм	D_{ex1}	100
Внутренний диаметр индуктора, мм	D_{in1}	10
Высота индуктора, мм	H_1	10
Внешний диаметр якоря, мм	D_{ex2}	100
Внутренний диаметр якоря, мм	D_{in2}	6
Высота якоря, мм	H_2	2
Толщина изоляции между индуктором и якорем, мм	ΔZ_0	1
Число витков индуктора, шт	n_1	42
Сечение витка медной шины, мм ²	$a \times b$	1,8 × 4,8
Коэффициент упругости возвратной пружины, кН/м	K_p	7,5
Масса ударного элемента, кг	m_2	0,35
Емкость ЕНЭ, мкФ	C	1980
Зарядное напряжение ЕНЭ, В	U_0	310
Частота импульсов, Гц	f_n	1
Мощность источника, Вт	P_1	95,14
Мощность в импульсе, кВт	P_2	7,92

На рис. 2 представлен экспериментальный образец и индуктор базового ИДД, обмотка которого монолитична эпоксидной смолой и размещена в стеклотекстолитовом каркасе.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

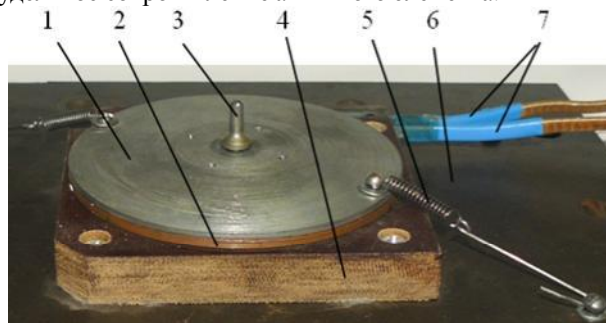
Расчет электромеханических характеристик ИДД производится по известной методике [7].

Для определения температур индуктора и якоря ИДД, изменяемых в течение рабочего процесса, используется схемно-полевая модель [8]. Полевая модель позволяет на каждом временном шаге учесть пространственное распределение температур в активных (токовых) и пассивных элементах ИДД:

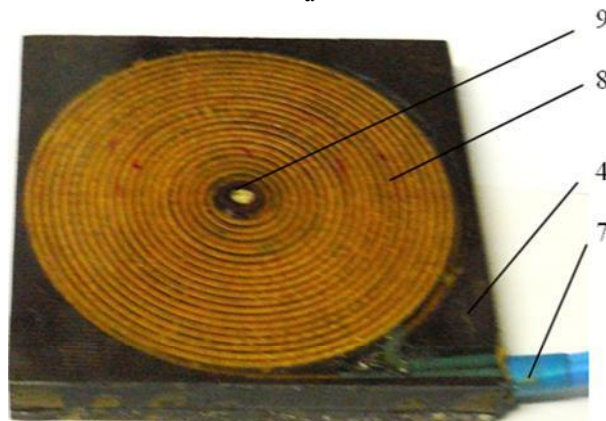
$$c_n(T) \cdot \gamma_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \lambda_n(T) \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) + j_n^2(t) \cdot k_z \cdot \rho_n(T),$$

$$c_m(T) \cdot \gamma_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m(T) \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right),$$

где $n = 1, 2$ – индексы индуктора и якоря соответственно; $m = 3, 4$ – индексы изоляционного каркаса с направляющей втулкой и ударной стальной пластины соответственно; $c(T)$ – усредненная удельная теплоемкость; γ – усредненная плотность материала; $j(t)$ – плотность тока активного элемента; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности; k_z – коэффициент заполнения индуктора; $\rho(T)$ – удельное сопротивление активного элемента.



а



б

Рис. 2. ИДД (а) и его индуктор (б): 1 – ударная пластина; 2 – якорь; 3 – боек; 4 – каркас индуктора; 5 – возвратные пружины; 6 – опорная пластина; 7 – тоководы индуктора; 8 – обмотка индуктора; 9 – втулка направляющая

Эта система уравнений дополняется граничными условиями на поверхностях f . На охлаждаемых поверхностях используются граничные условия третьего рода, описывающие процесс теплоотдачи

$$-\frac{\partial T_f}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_f - T_0),$$

где α – коэффициент теплоотдачи; n – нормаль к поверхности.

На границе контакта индуктора с каркасом и якоря с ударной пластиной – граничные условия четвертого рода

$$T_n(r_f, z_f, t) = T_m(r_f, z_f, t);$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_{nf}}{\partial n} = \lambda_m \frac{\partial T_{mf}}{\partial n}.$$

На оси симметрии ИДД – граничное условие второго рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_f = 0.$$

Коэффициент теплопроводности индуктора вдоль соответствующих осей определяется как

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_n \lambda_u \lambda_k (h_n + 2h_u + h_k)}{h_n \lambda_u \lambda_k + 2h_u \lambda_n \lambda_k + h_k \lambda_n \lambda_u},$$

где $\lambda_n, \lambda_u, \lambda_k$ – коэффициенты теплопроводности проводника, изоляции и эпоксидного компаунда соответственно; h_n, h_u, h_k – толщина проводника, изоляции и компаунда в соответствующем направлении.

Для описания переходных процессов целесообразно использовать так называемую схемную модель [8], построенную на основе эквивалентных схем замещения, в которой основные параметры и характеристики элементов схемы замещения определяются из полевой модели.

В схемной модели усредненные по сечению температуры n -ого активных элементов при наличии теплового контакта между ними через изоляционную прокладку, можно описать рекуррентным соотношением [9]

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \cdot \exp\left[\frac{-\Delta t}{c_n(T_n)\gamma_n H_n} \left(\frac{P_n \alpha T_n(V)}{\pi(D_{ex}^2 - D_{in}^2)} + \frac{\lambda_u(T)}{d_a + \Delta Z}\right)\right] + \left\{1 - \exp\left[\frac{-\Delta t}{c_n(T_n)\gamma_n H_n} \left(\frac{P_n \alpha T_n(V)}{\pi(D_{ex}^2 - D_{in}^2)} + \frac{\lambda_u(T)}{d_a + \Delta Z}\right)\right]\right\} \times \frac{i_n^2(t_k) R_n(T_n) + T_0 P_n \alpha T_n(V) + T_r(t_k) \zeta}{\alpha T_n(V) F_{cm} + \zeta},$$

где $\zeta = \pi \lambda_u(T) (D_{ex}^2 - D_{in}^2) (d_a + \Delta Z)^{-1}$; $\lambda_u(T)$ – коэффициент теплопроводности изоляционной прокладки; R_n – сопротивление индуктора ($n = 1$) и якоря ($n = 2$); d_a – толщина прокладки; P_n – площадь поверхности охлаждения активного элемента; D_{ex}, D_{in} – внешний и внутренний диаметры активных элементов соответственно; ΔZ – величина перемещения якоря; V – скорость перемещения якоря; $r = 2, 1$ при $n = 1, 2$ соответственно.

В схемной модели все параметры считаются сосредоточенными и представляют собой усредненные значения, полученные из полевой модели. Такая схемно-полевая модель позволяет обеспечить высокую скорость расчета переходных процессов с учетом пространственного распределения температур по активным элементам ИДД.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА БАЗОВОГО ИДД

При работе ИДД его электромеханические и тепловые процессы во многом зависят от режима работы. Можно выделить следующие режимы:

- режим холостого хода (РХ), при котором якорь выведен из магнитного взаимодействия с индуктором, возбуждаемым от ЕНЭ;
- режим движения (РД), при котором подвижный якорь магнитно взаимодействует с индуктором и ускоряет боек с ударной пластиной, т.е. электродинамическая сила превышает тормозные силы;
- режим торможения (РТ), при котором якорь не-

подвижен и находится в зоне максимальной магнитной связи с индуктором, т.е. тормозная сила многократно превышает электродинамические силы.

В зависимости от режима работы существенно меняются токовые характеристики ИДД в фазе нагрузки (рис. 3). Так в режиме РХ однополярный импульс тока в индукторе имеет резкий фронт с относительно медленным затуханием. В режимах РД и РТ за счет возникновения импульса тока в якоре изменяемой полярности фронт тока в индукторе обостряется, возрастает величина импульса и происходит быстрое его затухание.

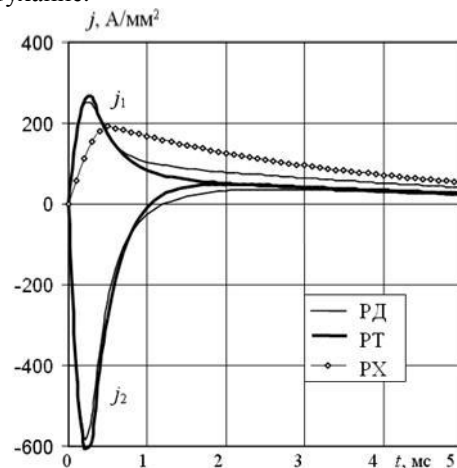


Рис. 3. Плотности токов индуктора j_1 и якоря j_2 в фазе нагрузки при работе ИДД в режимах РД, РТ, РХ

В режиме РТ энергия ЕНЭ $W_0 = 0,5CU_0^2$ поступает на нагрев активных элементов

$$W_n = \int i_n^2(t) R_n(T_n) dt, \quad n = 1, 2;$$

в режиме РХ – только на нагрев индуктора; в режиме РД энергия распределяется на нагрев индуктора и якоря, на движение якоря массой m_2 с ударным элементом массой m_g

$$W_{kin} = 0,5(m_2 + m_g) \cdot V^2(t),$$

на сжатие возвратной пружины

$$W_{pr} = 0,5K_p \Delta Z^2(t),$$

и на аэродинамическое сопротивление воздуха.

При работе в циклическом режиме РД характер токов практически сохраняется при условии, что последующий импульс возникает после полного затухания предыдущего (рис. 4,а). Отличие в характере импульсов возникает из-за изменения сопротивления активных элементов, обусловленное их нагревом, однако это проявляется в последующем.

Под действием электродинамических сил якорь с ударным элементом перемещается на расстояние ΔZ со скоростью V в прямом направлении, а под действием возвратной пружины – в обратном направлении до соприкосновения с индуктором (рис. 4,б). Механические процессы на начальных циклах работы ИДД практически повторяются, но с течением времени приобретают меньшую амплитуду из-за возрастающего сопротивления активных элементов.

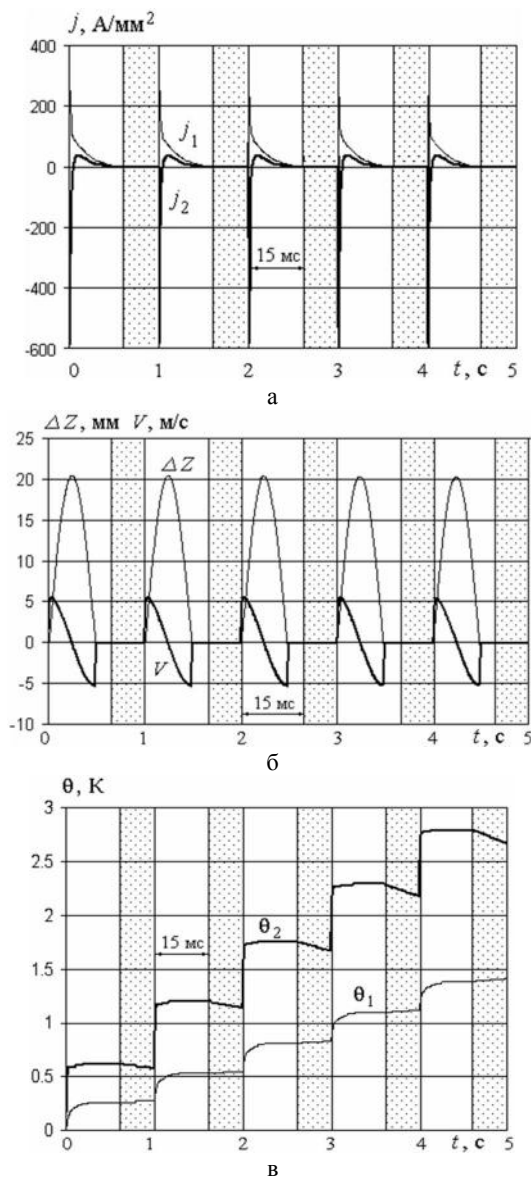


Рис. 4. Электрические (а), механические (б) и тепловые (в) временные зависимости при работе ИДД с частотой 1 Гц в режиме РД

На рис. 4,в показаны превышения температур активных элементов $\theta = T_0 - T_n$ за первые рабочие циклы. Превышение температуры якоря на начальных рабочих циклах возрастает примерно в 2 раза быстрее, чем у индуктора. При этом в течение фазы нагрузки рабочего цикла (продолжительностью 15 мс) температура индуктора возрастает плавно, а в якоре – практически мгновенно. В течение фазы нагрузки между активными элементами отсутствует тепловое взаимодействие за счет перемещения якоря на расстояние ΔZ , а за счет скорости V возникает перемещение находящегося между ними воздуха, что влияет на величину коэффициента теплоотдачи $\alpha(V)$ [10].

В течение паузы рабочего цикла (от 15 мс до 1 с) якорь находится в контакте с индуктором, что влияет на их тепловое состояние: нагрев индуктора повышается, а якоря уменьшается. Причем интенсивность этого процесса возрастает с числом рабочих циклов ИДД, что объясняется возрастающими перепадами температур между активными элементами.

При работе ИДД достаточно продолжительное время (до 5 мин) с частотой следования импульсов 1 Гц тепловая энергия в активных элементах возрастает практически линейно, но существенно зависят от режима работы. На рис. 5 представлены зависимости выделенной тепловой энергии W_1 в индукторе и якоре W_2 . В режиме РХ вся энергия ЕНЭ поступает на нагрев индуктора. В режиме РТ – эта энергия перераспределяется между индуктором и якром, причем в последнем выделяется меньшая часть. А в режиме РД, где присутствуют другие связанные с движением энерговыделения, в якоре и индукторе выделяется наименьшее количество тепловой энергии.

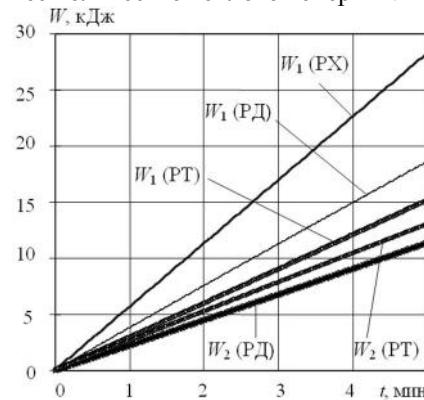


Рис. 5. Зависимости тепловой энергии в индукторе W_1 и якоре W_2 от времени работы ИДД с частотой 1 Гц

Указанное распределение энергии приводит к тому, что рост превышения температуры индуктора существенно зависит от режима нагрузки (рис. 6). Наиболее напряженным в тепловом отношении для индуктора является режим РХ, а наиболее благоприятным – режим РД. Температурные зависимости имеют тенденцию замедления роста, но превышения температур за 5-7 мин достигают предельной величины 110-120 °С, при котором начинает размягчаться эпоксидная смола, компаундирующая обмотку индуктора.

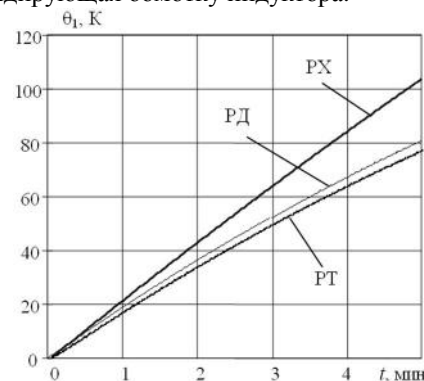


Рис. 6. Зависимости превышения температуры индуктора от времени работы ИДД с частотой 1 Гц

Рассмотрим пространственные распределения температур в поперечном сечении ИДД в зависимости от режима работы за одно и то же время – 10 с. На рис. 7 показаны: проводники обмотки индуктора 1, междувитковая изоляция 2, стеклотекстолитовый каркас 3, внутренняя текстолитовая направляющая втулка 4, центральное отверстие 5, якорь 6, ударная пластина 7, зазор между якром и индуктором 8, линии равных

температур 9. Здесь же представлены шкала температур и их распределения по участкам ИДД.

Наиболее нагретым элементом конструкции является медный якорь со стальной ударной пластиной, на участках которых практически одинаковая температура. Градиент температур на обмотке индуктора незначительный, и в основном он возникает в каркасе и втулке, выполненных из непроводящих материалов.

В режиме РТ температура как якоря, так и индуктора выше, чем в режиме РД, а в режиме РХ температура индуктора наибольшая.

Представленные зависимости обосновывают использование усредненных температур для индуктора и якоря при расчете переходного процесса в схемной модели и позволяют определить реальные тепловые потоки через различные поверхности ИДД с уточненными коэффициентами теплоотдачи.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИДД В РЕЖИМЕ РД НА ЕГО ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Рассмотрим влияние частоты $f_{и}$ следования импульсов на нагрев индуктора и якоря. На рис. 8 показано, как с увеличением периода следования импульсов $T_{и} = 1/f_{и}$ происходит уменьшение нагрева индуктора θ_1 и якоря θ_2 за 300 рабочих циклов. С уменьшением частоты $f_{и}$ от 5 до 1 Гц ($T_{и}$ увеличивается от 0,2 до 1,0 с) нагрев индуктора уменьшается на 15 %, в то время как нагрев якоря уменьшается на 33 %. При этом нагрев якоря превышает нагрев индуктора, но с увеличением периода $T_{и}$ эта разность уменьшается. Это объясняется более продолжительным временем теплового контакта индуктора и якоря, а значит и более эффективным теплообменом между ними.

На рис. 9 показан рост нагрева индуктора θ_1 и якоря θ_2 при работе ИДД с частотами 1 и 5 Гц от количества рабочих импульсов N .

При работе с частотой 1 Гц нагрев якоря не значительно превышает нагрев индуктора, причем разность между ними с ростом количества импульсов уменьшается. При работе с частотой 5 Гц нагрев якоря значительно больше, чем у индуктора, причем разность между ними с ростом количества импульсов практически неизменна. Поскольку при работе ИДД с частотой 1 Гц 300 импульсов реализуется за 5 мин, а при работе с частотой 5 Гц – за 1 мин, то очевидно последний режим работы значительно более напряжен в тепловом отношении. Фактически представленные зависимости показывают допустимое число рабочих импульсов, при которых не происходит повреждение элементов ИДД.

Одним из путей уменьшения тепловой нагрузки якоря представляется увеличение его высоты (рис. 10). При увеличении высоты якоря от 2 до 3 мм эффективность ИДД, оцениваемая соотношением

$$\eta = (m_2 + m_g) \cdot V^2 C^{-1} \cdot U_0^{-2},$$

возрастает на 22 %. При этом происходит перераспределение тепловой энергии: в якорю тепловая энергия W_2 уменьшается, а в индукторе W_1 – возрастает. В результате этого разность между нагревом якоря и индуктора уменьшается, и, что важно, уменьшаются, хотя и незначительно, и сами нагревы.

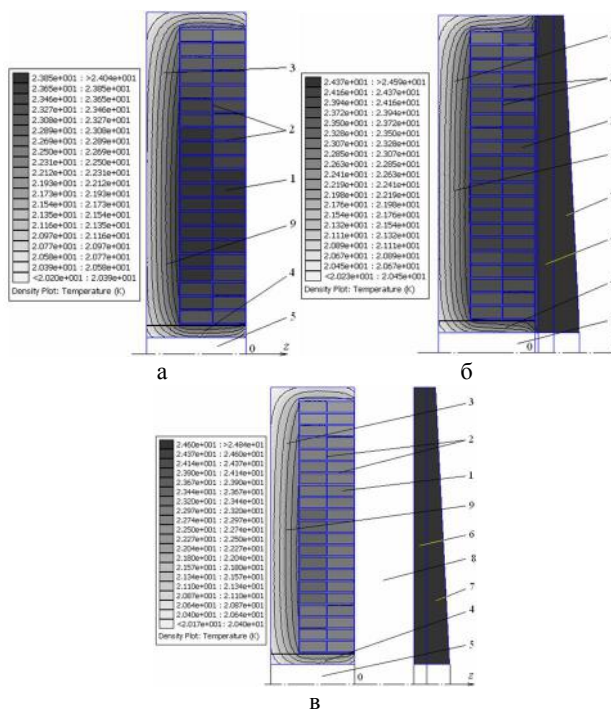


Рис. 7. Распределения температур по сечению на 10^{10} секунде при работе ИДД в режиме: а) РХ; б) РТ; в) РД

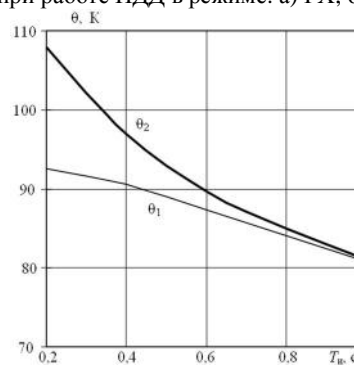


Рис. 8. Зависимость превышения температур индуктора и якоря за 300 циклов от периода следования импульсов

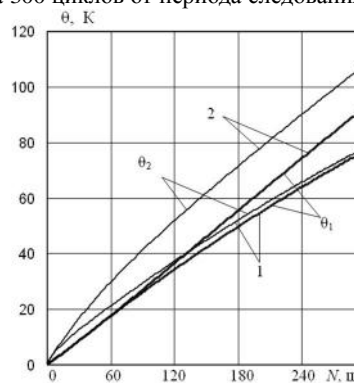


Рис. 9. Зависимость превышения температур индуктора и якоря от количества рабочих циклов при работе ИДД с частотой: 1 – 1 Гц; 2 – 5 Гц

Другим конструктивным элементом ИДД, влияющим на нагрев активных элементов, является площадь поверхности охлаждения индуктора P_1 (неконтактируемая с каркасом и внутренней направляющей втулкой). На рис. 11 показаны превышения температур индуктора θ_1 и якоря θ_2 ИДД, работающего с частотой 1 Гц, у которого изменяется площадь поверхности охлаждения индуктора.

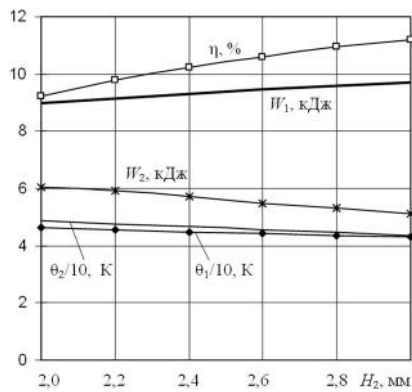


Рис. 10. Зависимость энергетических и тепловых параметров от высоты якоря за 150 с при работе ИДД с частотой 1 Гц

Очевидно, что с увеличением площади поверхности P_1 нагрев индуктора уменьшается, хотя и незначительно (на 5,5 % при увеличении площади поверхности в 4 раза), но при этом также снижается и нагрев якоря (на 4,3 %) из-за теплового взаимодействия между ними во время паузы рабочего цикла.

Необходимо отметить довольно сильную тепловую связь между индуктором и якорем. На рис. 12 показаны превышения температур индуктора и якоря для базового ИДД, для двигателя, у которого площадь поверхности охлаждения индуктора уменьшена в 2 раза, и для двигателя, у которого площадь поверхности охлаждения якоря уменьшена в 2 раза. Из представленных зависимостей следует, что уменьшение площади поверхности охлаждения индуктора или якоря вызывает увеличение нагрева как данного элемента, так и элемента, у которого площадь поверхности охлаждения остается неизменной.

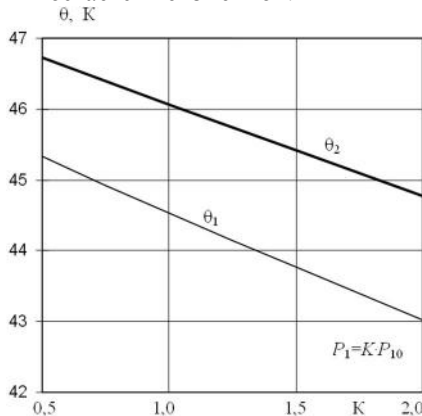


Рис. 11. Зависимость превышения температур индуктора и якоря от площади поверхности охлаждения индуктора P_1 по отношению к базовому варианту P_{10} за 150 рабочих циклов

Таким образом, увеличение площади поверхности охлаждения любого из активных элементов радикально не решает проблему нагрева рассматриваемого ИДД, работающего с частотой 1 Гц.

В качестве достижения устойчивой температуры активных элементов при длительной работе ИДД в циклическом режиме предлагается интенсификация охлаждения, например за счет обеспечения вентиляции воздуха или использования водяного охлаждения [10].

Учитывая тепловую связь между активными элементами ИДД, предлагается интенсивное охлаждение

только неподвижного индуктора. На рис. 13 представлены превышения температур индуктора и якоря ИДД при интенсивном охлаждении индуктора с различными коэффициентами теплоотдачи.

С повышением интенсивности охлаждения индуктора уменьшается нагрев обоих активных элементов, но разность температур между ними возрастает. При этом обеспечивается стабилизация температур, что позволяет не ограничивать время работы рассматриваемого ИДД циклического действия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки основных теоретических положений были проведены измерения температуры на поверхности индуктора 1 базового ИДД со стеклотекстолитовым каркасом и индуктора 2 со стальным каркасом, у которого отвод тепла осуществляется со всей его поверхности при работе с частотой 1 Гц (рис. 14). В экспериментах использовался режим РХ.

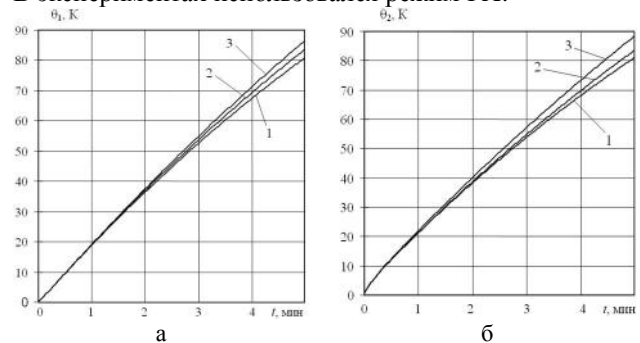


Рис. 12. Зависимость превышения температур индуктора (а) и якоря (б): 1 – базовый вариант; 2 – поверхность охлаждения индуктора уменьшена в 2 раза; 3 – поверхность охлаждения якоря уменьшена в 2 раза

Измерение проводилось прибором М 890G, снабженного термопарой. Участок измерения температуры индукторов расположен на расстоянии 20 мм от оси. Показано, что индуктор 2 со стальным каркасом нагревается несколько медленнее, чем индуктор 1 со стеклотекстолитовым каркасом, благодаря улучшенному теплоотводу (рис. 15).

Экспериментальные зависимости с точностью до 6 % совпадают с расчетными результатами, что подтверждает достоверность математических моделей.

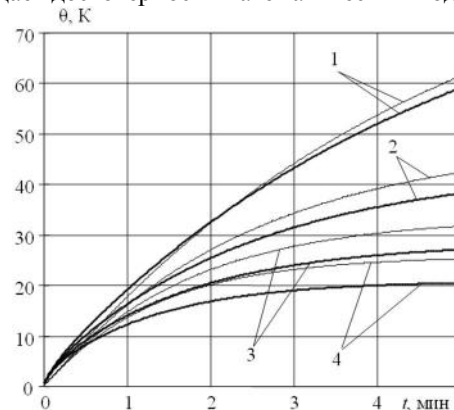


Рис. 13. Зависимость превышения температур индуктора (тонкие линии) и якоря (жирные линии) от времени работы ИДД при охлаждении индуктора с коэффициентом теплоотдачи α , Вт/(м² К): 1 – 50; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200

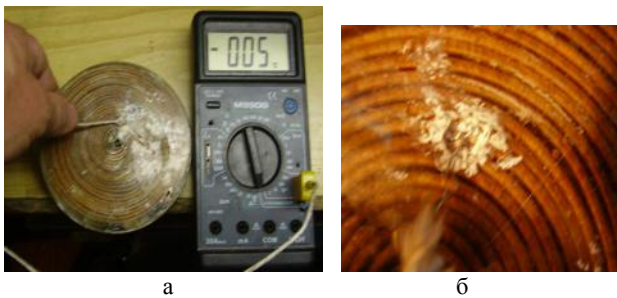


Рис. 14. Способ измерения температуры поверхности индуктора со стальным каркасом: а) измерительный прибор и индуктор; б) участок измерения температуры индуктора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель, описывающая тепловое состояние индукционно-динамического двигателя циклического действия. Для определения изменяемых в течение рабочего процесса температур индуктора и якоря ИДД, используются схемно-полевая модель. Установлено влияние режимов холостого хода, при котором якорь выведен из магнитного взаимодействия с возбуждаемым индуктором, движения и торможения якоря на нагрев активных элементов. В режиме движения якоря исследованы зависимости превышений температур активных элементов от частоты следования импульсов, высоты якоря, площади охлаждения активных элементов и интенсивности охлаждения индуктора.

Проведенные экспериментальные исследования тепловых процессов подтвердили достоверность математической модели и результатов расчетов.

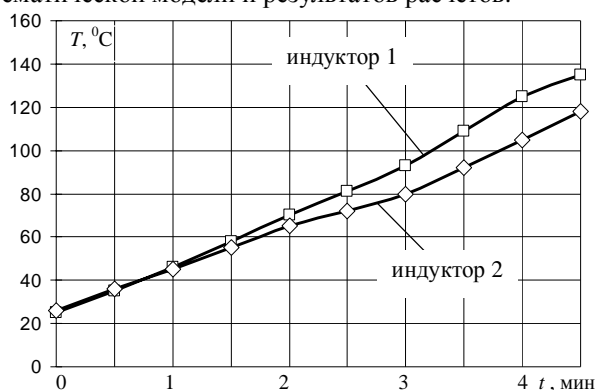


Рис. 15. Экспериментальные зависимости температуры на поверхности индуктора ИДД при работе с частотой 1 Гц

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития: Труды междунауч.-техн. конф. МИОМ-2007. – Самара, 18-19 сентября 2007. – Самара: СГАУ, 2007. – 280 с.
2. Field J.E.. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies// Int. J. Imp. Eng. – Vol. 30, 2004. – P. 725-775.
3. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 9-14.
4. Болух В.Ф., Назаренко С.А., Рассоха М.А. Мультиполевая модель импульсного электромеханического преобразователя // Интегровані технології та енергозбереження. – 2009. – № 3. – С. 34-40.
5. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.

6. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Синтез параметров высокоэффективного электромеханического преобразователя ударного действия // Технічна електродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 2. – С. 63-68.
7. Болух В.Ф. Влияние длительности токов обмотки возбуждения и якоря на эффективность индукционно-динамического электродвигателя // Электротехника. – 2001. – № 11. – С. 27-31.
8. Птах Г.К. Методологические аспекты разработки компьютерных моделей электромеханических преобразователей // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – № 1. – С. 7-11.
9. Болух В.Ф. Электродинамические процессы в линейном импульсно-индукционном двигателе с подвижной криореактивной обмоткой возбуждения // Электротехника. – 1999. – № 2. – С. 3-10.
10. Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1974. – 384 с.

Bibliography (transliterated): 1. Magnitno-impul'naja obrabotka materialov. Puti covershenctvovaniya i razvitiya: Trud'i mejd. nauch.-tehn. konf. MIOM-2007. - Samara, 18-19 sentjabrja 2007. - Samara: CGAU, 2007. - 280 s. 2. Field J.E.. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies// Int. J. Imp. Eng. - Vol. 30, 2004. - P. 725-775. 3. Boljuh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Schukin I.S. Energeticheskie protsess'i i effektivnost' induktsionno-dinamicheskogo preobrazovatelja udarnogo de'ctvija // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 2. - С. 9-14. 4. Boljuh V.F., Nazarenko S.A., Rassoha M.A. Multipolevaja model' impul'nogo elektromehaničeskogo preobrazovatelja // Integrovani tehnologii ta energozberežennja. - 2009. - № 3. - С. 34-40. 5. Gurevich E.I., Ribin JU.L. Perehodn'ie teplov'ie protsess'i v električeskix mashinah. - L.: Energoatomizdat, 1983. - 216 s. 6. Boljuh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Schukin I.S. Sintez parametrov vi-cokoeffektivnogo elektromehaničeskogo preobrazovatelja udarnogo de'ctvija // Tehnična elektrodinamika. Tem. vipusk: Problemi sучасної електротехніки. - 2008. - Ч. 2. - С. 63-68. 7. Boljuh V.F. Vlijanie dlitel'nosti tokov obmotki vozbuždenija i jakorja na effektivnost' induktsionno-dinamicheskogo elektrodvigatelja // Elektrotehnika. - 2001. - № 11. - С. 27-31. 8. Ptah G.K. Metodologičeskie aspekti razrabotki kompjutern'ih modelej elektromehaničeskix preobrazovatelej // Izvestija vuzov. Elektromehanika. - 2003. - № 1. - С. 7-11. 9. Boljuh V.F. Elektrodinamicheskie protsess'i v line'nom impul'no-induktsionnom dvigatele s podvijno' kriorezistivno' obmotko' vozbuždenija // Elektrotehnika. - 1999. - № 2. - С. 3-10. 10. Filippov I.F. Osnovi teploobmena v električeskix mashinah. - L.: Energija, 1974. - 384 s.

Поступила 04.10.2010

Болух Владимир Федорович, д.т.н., проф.
Щукин Игорь Сергеевич, к.т.н., доц.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
ООО Фирма "ТЭТРА Ltd",
61002, Украина, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076427
e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, tech@tetra.kharkiv.com

Bolyukh V.F., Schukin I.S.

Features of thermal conditions of an inductive dynamic cyclic motor.

A mathematical model describing thermal conditions of an inductive dynamic cyclic motor is developed. To determine the inductor and the armature temperatures which vary during the working process, a circuit and a field models are used. The effect of the armature idling, motion, and braking on the motor thermal conditions has been revealed. In the armature motion mode, the active elements temperature increase versus pulse repetition frequency, the armature height, the active elements cooling area, and the inductor cooling rate is studied. Experimental investigations conducted prove validity of the mathematical model and the calculation results.

Key words – inductive dynamic cyclic motor, mathematical model, thermal conditions, experimental investigations, inductor and armature temperatures.

ВЛИЯНИЕ УСИЛИЯ ЗАМЫКАНИЯ РАЗРЫВНЫХ КОНТАКТОВ НА ПЕРЕХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Наведені результати досліджень впливу нормальному та тангенціальній складовій зусиль замикання електричних контактів на перехідний опір. Показано, що наявність тангенціальної складової призводить до збільшення фактичної площі контакту та зниженню перехідного опору.

Приведены результаты исследований влияния нормальной и тангенциальной составляющей усилий замыкания электрических контактов на переходное сопротивление. Показано, что наличие тангенциальной составляющей приводит к увеличению фактической площади контакта и снижению переходного сопротивления.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние переходного сопротивления на энергопотери в разрывных контактах особо активно проявляются в процессе коммутации. Хорошо известно, что характер этих потерь обусловлен двумя основными факторами: микрогеометрией контактных поверхностей и наличием на них поверхностных пленок. В нормальных условиях эксплуатации для сильноточных контактов первый фактор является определяющим, что многократно находило экспериментальное подтверждение, как например, в эмпирической зависимости Н.Е. Лысова [1]:

$$R = \frac{k}{(0,1 \cdot P_k)^m} \times 10^{-6}, \quad (1)$$

где R – переходное сопротивление; P_k – усилие сжатия контактов; m , k – коэффициенты, зависящие от конструкции контактов и вида контактных материалов.

На практике, снижение переходного сопротивления с ростом усилия замыкания происходит неравномерно, с постепенным приближением к относительно стабильному значению. Это объясняется механическими процессами упрочнения сжимаемых микровыступов контактной поверхности и стабилизацией площади фактического контакта. Дальнейшее наращивание усилия замыкания контактов становится малоэффективным.

Однако увеличить фактическую площадь контакта можно и без увеличения усилия замыкания, а путем более рационального распределения его по контактной поверхности. Теоретические предпосылки к этому утверждению основаны на модели процесса взаимодействия контактных поверхностей разработанной Р. Хольмом и др. [2, 3]. Так, например, на рис. 1,а показан механизм образования фактической площади контактного взаимодействия под действием нормального усилия замыкания P_k .

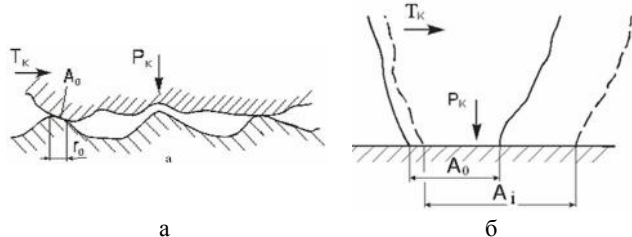


Рис. 1. Схема контактного взаимодействия при сложном нагружении (а) единичной точки (б)

Тогда площадь единичного контакта микронеровностей A_i представляется круговой поверхностью радиуса r_0 :

$$r_0 = \sqrt{\frac{P_{ki}}{\pi H}}, \quad (2)$$

где P_{ki} – нормальное усилие замыкания, приходящее-

ся на единичное пятно контактной поверхности; H – контактная твердость.

Если в таком состоянии к замкнутым контактным деталям приложить дополнительно касательное усилие T_k , то это увеличит площадку единичного контакта A_i , преобразовав ее в форму эллипса (рис. 1,б). Объяснение роста площади контакта под действием одновременно двух сил (нормальной и касательной) следует из уравнения текучести контактного материала [2, 3]:

$$p^2 + \alpha^2 s^2 = p^{*2}, \quad (3)$$

где $\alpha \sim 10$ – постоянная, зависящая от пластичности контактного материала; $p = P_{ki}/A_i$ – нормальное напряжение на пятне контакта; $s = T_k/A_i$ – касательное напряжение на пятне контакта; p^* – предел текучести контактного материала.

При отсутствии T_k , s равно нулю, а давление на пятне контакта приближается к пределу текучести $p = p^*$. Тогда:

$$A_0 = P_{Ki} / p^*. \quad (4)$$

Теоретически рост контактной поверхности должен был прекратиться, когда p станет меньше p^* . Однако, при приложении касательного усилия нарушается условие пластичности. Пластическая деформация контактного материала продолжает увеличиваться,

поскольку полное напряжение $\sqrt{p^2 + \alpha^2 s^2}$ все еще соответствует случаю пластического течения, которое возможно при росте площади единичного контакта A_i до размеров [2]:

$$A_i = A_0(1 + \alpha(T_k / P_k)^2)^{1/2}. \quad (5)$$

Теоретически, рост площади пятен контакта ограничен только пределом прочности на срез поверхностного слоя и для чистых поверхностей, значение A_i может в четыре и более раза превзойти A_0 , прежде чем произойдет их проскальзывание [3]. Экспериментальная проверка этих положений была проведена на установке по измерению переходного сопротивления, вид и схема которой показаны на рис. 2.

Поверхности исследуемых контактов, изготовленные из меди, латуни и серебра имели полусферические очертания с чистой обработкой поверхности $R_a 1,6$. Измерение переходного сопротивления осуществлялось с помощью амперметра и милливольтметра. Сила тока проходящего через контакты удерживалась на значении 1 А. Сила нормального замыкания назначалась в пределах от 2 кг до 10 кг для всех контактных материалов. Касательное усилие прикладывалось плавно с помощью микрометрического винта, ход которого не превышал 0,2 мм. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

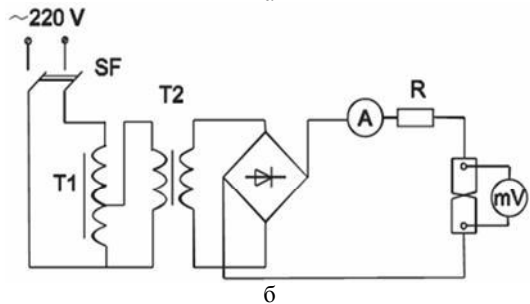
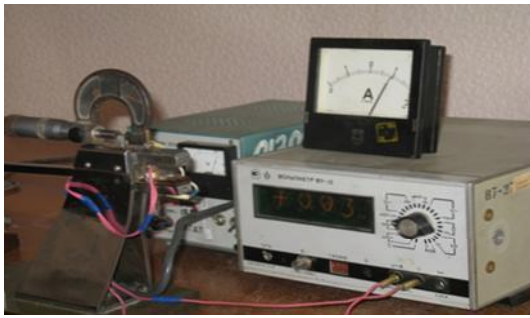


Рис. 2. Внешний вид (а) и электрическая схема установки (б)

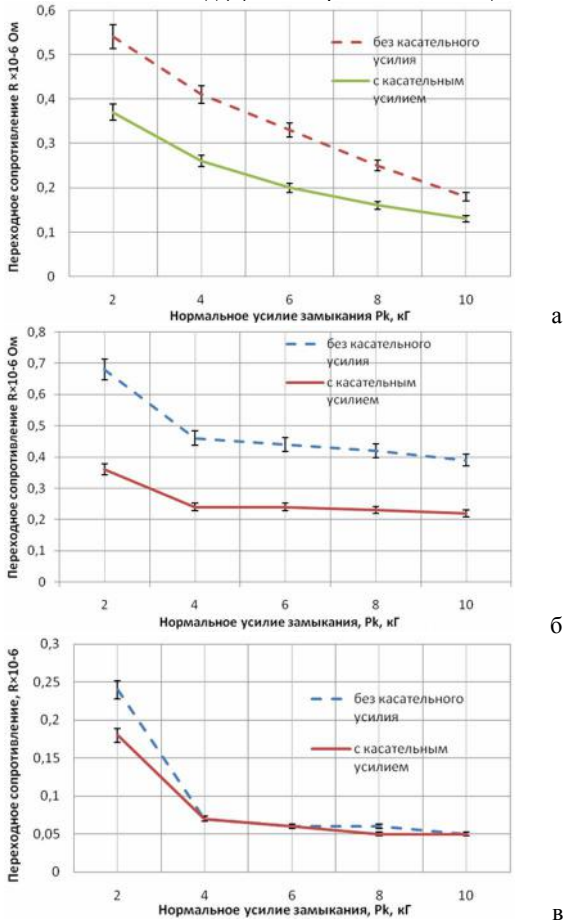


Рис. 3. Переходное сопротивление разрывных контактов из меди (а), латуни (б), серебра (в) в зависимости от характера нагрузки

Результаты эксперимента, полученные как средневзвешенное значение многократных измерений переходного сопротивления на пяти уровнях усилия сжатия для трех различных контактных материалов показали, что наличие тангенциального усилия приводит к снижению их переходного сопротивления (рис. 3). Особенно наглядно это проявляется при усилиях сжатия контактов до 4 кг, когда снижение пере-

ходного сопротивления составило от 41 до 46 % для медных и 44 до 66 % для латунных контактов. Для серебряных контактов этот эффект проявился только в диапазоне усилий сжатия 2-3 кг, что объясняется меньшим напряжением текучести серебра, а, следовательно, более быстрой деформации микронеровностей контактных поверхностей. Из диаграмм на рис. 3 видно, что приложение касательного усилия к контактам позволит получить такие же значения переходного сопротивления, но при более низких усилиях сжатия (от 1,5 до 3 раз меньше для медных контактов и более чем в 5 раз меньше для латунных).

Следует признать, что результаты эксперимента не носят обобщенный характер, поскольку существенно зависят от нестабильности формы и вида взаимодействия контактных поверхностей. Однако это не отвергает существование общей тенденции к снижению переходного сопротивления сжатых электрических контактов при приложении к ним касательного усилия.

ВЫВОДЫ

Стабилизация переходного сопротивления с ростом усилия замыкания зависит от механических свойств контактных материалов. Для более мягких материалов это происходит быстрее и при более низких значениях.

Приложение касательного усилия к замкнутым контактам позволяет существенно снизить их переходное сопротивление.

Практический результат, вытекающий из проведенных исследований, состоит в том, что достаточно низкого значения переходного сопротивления разрывных контактов можно достигать без наращивания жесткости пружин замыкания в приводах коммутационных устройств. Следовательно, это позволит снизить требования к прочности элементов механизмов коммутации и изготавливать их более легким и компактным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрический справочник в 3-х т. / [Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др.]. – М.: Энергоиздат, 1981 – Т.2: Электротехнические устройства, 1981. – 640 с.
2. Мышкин Н.К. Электрические контакты / Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 560 с.
3. Мур Д. Основы и применения триботехники / Д. Мур. – М.: Мир, 1978. – 488 с.

Bibliography (transliterated): 1. Elektrischeckij' cpravochnik v 3-h t. / [Pod obsch. red. V.G. Geracimova i dr.]. – M.: Energoizdat, 1981 – T.2: Elektrotehnicheckie ucro'ctva, 1981. – 640 c. 2. M'ishkin N.K. Elektrischeckie kontakt'i / M'ishkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M. – Dolgoprudn'i': Intellekt, 2008. – 560 c. 3. Mur D. Ocnov'i i primenenija tribotehniki / D. Mur. – M.: Mir, 1978. – 488 c.

Поступила 28.10.2010

Волкова Ольга Григорівна
Запорізький національний технічний університет
кафедра теоретичної та загальної електротехніки
69063, Запоріжжя, вул. Жуковського 64
тел. (0612) 34-76-78, e-mail: volkova@zntu.edu.ua

Volkova O.G. **Influence of interrupting contacts closure force on transient resistance.**

Results of research into influence of normal and tangential components of interrupting electric contact closure force on transient resistance are presented. It is shown that the tangential component results in increasing the actual contact area and decreasing the transient resistance.

Key words – interrupting contact, transient resistance, contact area, pressure, microgeometry.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛИНОМИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ

У статті розглядаються математичні моделі асинхронного електропривода з векторним керуванням для вирішення задач синтезу астатичних регуляторів швидкості методом поліноміальних рівнянь і параметричної оптимізації по комплексному критерію максимальної добротності і запасу стійкості для покращення динамічних характеристик електроприводу.

В статье рассматриваются математические модели асинхронного электропривода с векторным управлением для решения задач синтеза астатических регуляторов скорости методом полиномиальных уравнений и параметрической оптимизации по комплексному критерию максимальной добротности и запаса устойчивости для улучшения динамических характеристик электропривода.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время благодаря применению метода диаграмм качества управления (ДКУ) достигнуто сбалансированное улучшение динамических характеристик электроприводов (ЭП) постоянного тока, построенных по принципу систем подчиненного регулирования (СПР) с астатическими регуляторами скорости [1]. Кроме того, положительные результаты получены при синтезе полиномиальным методом регуляторов скорости для систем, отличающихся сложной механической частью ЭП, в ряде случаев представляемых неминимально фазовыми звеньями [2]. Эти исследования также относились к ЭП постоянного тока.

Наметившаяся в последние годы тенденция к расширению области применения частотно-регулируемых электроприводов переменного тока для механизмов с высокими требованиями к динамическим характеристикам, вызывает необходимость повышения качества управления многократно интегрирующих (условно устойчивых) систем с векторным управлением путем комплексного использования методов полиномиальных уравнений и ДКУ. Нелишним также может оказаться и использование систем модального управления с наблюдателями состояния.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является обоснование математических моделей асинхронного электропривода с векторным управлением для решения задач синтеза астатических регуляторов скорости методом полиномиальных уравнений и параметрической оптимизации по комплексному критерию максимальной добротности и запаса устойчивости (МДУ) для улучшения динамических характеристик ЭП. Предполагается, что данные модели должны соответствовать ЭП различных механизмов с одномассовой и двухмассовой механической частью с постоянным и нелинейным характером нагрузки, зависящим от скорости. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи: 1) обосновывается исходная математическая модель асинхронного ЭП и правомерность применения компенсирующих перекрестных связей; 2) подтверждается возможность перехода к рассмотрению одноканальной системы асинхронного ЭП с различными моделями механической части.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Примем, что исходная математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД с КЗ) во вращающейся ортогональной системе координат, ориентированной по потокоцеплению ротора, описывается следующими уравнениями [3]:

$$\begin{cases} U_{sd} + \frac{k_r}{T_r} \psi_r + \omega_k \sigma L_s i_{sq} = i_{sd} R_{sr} (T_{sr} p + 1); \\ U_{sq} - \omega_k \sigma L_s i_{sd} - z_p \omega k_r \psi_r = i_{sq} R_{sr} (T_{sr} p + 1); \\ L_m i_{sd} = \psi_r (T_r p + 1); \\ \omega_k = k_r R_r' \frac{i_{sq}}{\psi_r} + z_p \omega, \end{cases} \quad (1)$$

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}; R_{sr} = R_s + k_r^2 R_r'; \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}; T_{sr} = \frac{\sigma L_s}{R_{sr}},$$

где U_{sd} , U_{sq} , i_{sd} , i_{sq} – проекции напряжения и тока статора на оси d и q ; ω_k – частота вращения системы координат; ω – частота вращения двигателя; ψ_r – потокоцепление ротора; L_m – главная индуктивность двигателя; L_r , L_s – полные индуктивности ротора и статора; R_s – сопротивление обмотки статора; R_r' – приведенное сопротивление обмотки ротора; $T_r = L_r / R_r'$ – электромагнитная постоянная времени; z_p – число пар полюсов двигателя.

Уравнения для электромагнитного момента двигателя M и механического равновесия ЭП с моментом сопротивления M_c , зависящим от скорости, представляются в виде:

$$M = \frac{3}{2} z_p k_r \psi_r i_{sq}; \quad (2)$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (3)$$

$$M_c = M_{co} \pm \beta_c \omega, \quad (4)$$

где: J – приведенный к валу двигателя момент инерции; M_{co} – постоянная составляющая момента сопротивления; β_c – жесткость механической характеристики нагрузки.

На основании уравнений (1)-(4) при $\beta_c = 0$ составлена структурная схема короткозамкнутого АД, приведенная на рис. 1.

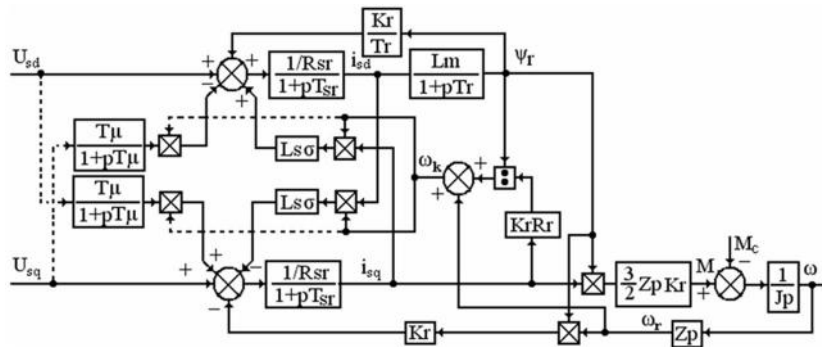


Рис.1. Структурная схема АД с КЗ во вращающейся системе координат, ориентированной по потокоцеплению ротора

Из рис. 1 видно, что АД как объект регулирования состоит из двух взаимозависимых каналов: потокоцепления ротора ψ_r и скорости двигателя ω . Зависимость каналов обусловлена наличием в структуре АД четырех внутренних обратных связей (из которых три нелинейные и две перекрестные). Также на рис. 1 учтены две перекрестные обратные связи непосредственного преобразователя частоты (ПЧ). Все они оказывают определенное влияние на динамику системы и

не позволяют синтезировать регуляторы классическим способом. В связи с этим в [3] предложено для развязки каналов регулирования использовать устройства компенсации внутренних обратных связей, а для линеаризации АД – ввести в систему нелинейные преобразователи координат. При этом структурная схема асинхронного ЭП, построенная по принципу СПР соответствует рис. 2.

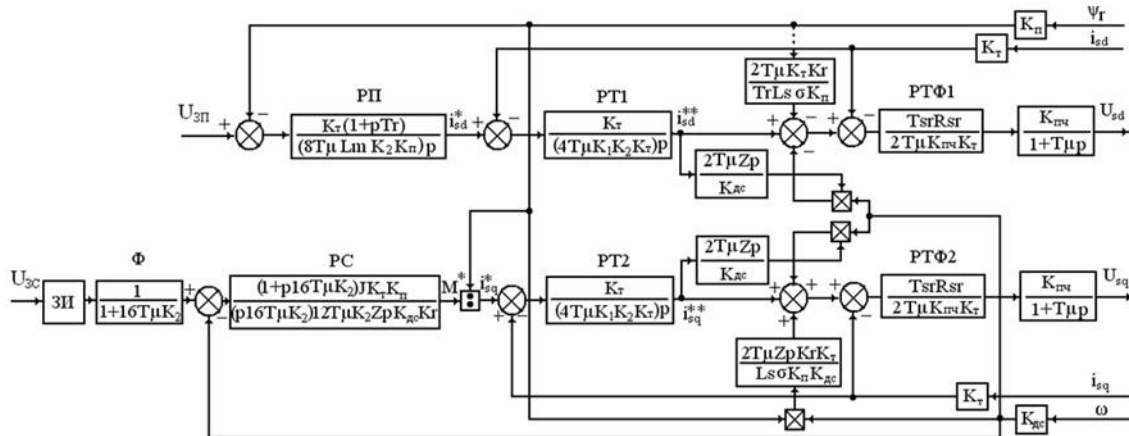


Рис. 2. Структурная схема системы векторного управления с компенсацией перекрестных обратных связей объекта управления

Для дальнейших исследований важно отметить, что система векторного управления имеет два канала:

- канал регулирования потокоцепления ротора, в котором контур регулирования реактивной составляющей тока статора i_{sd} с регулятором РТ1 подчинен контуру регулирования потокоцепления ψ_r с регулятором РП;

- канал регулирования момента, в котором регулятор скорости РС подключен к подчиненному контуру регулирования активной составляющей тока статора i_{sq} с регулятором РТ2 через делительное устройство. Благодаря этому осуществляется автоматическая перестройка коэффициента передачи канала при изменениях ψ_r .

Необходимо добавить, что из двух автономных подсистем одна выполняется (канал 1) как система стабилизации, а вторая (канал 2) – как программная.

Из структурной схемы рис.2 виден традиционный способ расчета астатического регулятора скорости.

Такой РС с типовой настройкой делает канал регулирования скорости и всю систему двукратно интегрирующей. Однако, даже с одномассовой механической частью, работающей при $M_c = \text{const}$, система рис. 2 не обеспечивает максимальной добротности и запаса устойчивости асинхронного ЭП с векторным управлением. Другими словами в представленной структуре условно устойчивой системы существует резерв повышения качества управления методом ДКУ [4].

Представленные структурные схемы самого АД (рис. 1) и его системы управления при указанной развязке каналов (рис. 2) могут быть использованы для дальнейшего улучшения динамических характеристик ЭП. При этом с учетом автономности каналов допускается, что в основу синтеза астатических регуляторов скорости, может быть положена одноканальная структурная схема, приведенная на рис. 3.

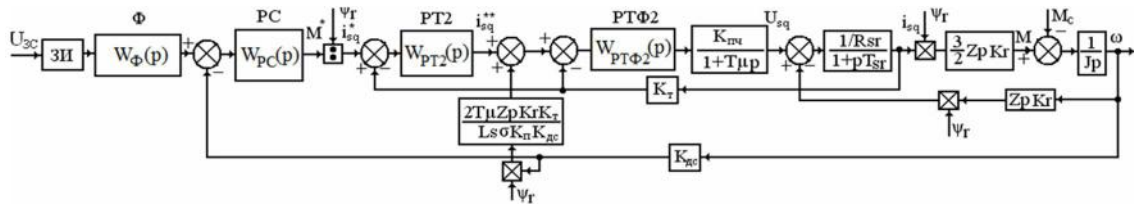


Рис. 3. Канал регулирования момента асинхронного электропривода

Для подтверждения правомерности применения указанных на рис. 2 компенсирующих связей и возможности перехода при синтезе регуляторов к одноканальной структуре регулирования скорости двигателя рис. 3, проведем их компьютерное моделирование [5] с традиционно синтезированными регуляторами. Для этих целей выберем АД типа МТКФ 312-8 со следующими параметрами [6]: $P_n = 13$ кВт; $U_n = 380$ В; $I_n = 31,8$ А; $I_o = 27,7$ А; $\cos\varphi_0 = 0,088$; $n_n = 690$ об/мин; $\cos\varphi = 0,63$; $\eta = 76$ %; $GD^2 = 1,55$ кгм²; $R_s = 0,45$ Ом; $X_{sl} = 0,53$ Ом; $R'_r = 0,64$ Ом; $X'_{rl} = 0,42$ Ом и преобразователя частоты: $K_{пч} = 38$; $T_{пч} = 0,002$ с; $K_T = 0,1258$ В/А; $K_{дс} = 0,1384$ Вс; $K_n = 14,6326$ В/Вб; $K_1 = 0,4129$; $K_2 = 0,7065$; $Kr = 0,9808$; $z_p = 4$; $T_{sr} = 0,0028$ с;

$R_{sr} = 1,0657$ Ом; $J = 0,3875$ кгм²; $Tr = 0,1088$ с; $L_s = 0,07$ Гн; $L_m = 0,0683$ Гн; $\sigma = 0,0428$ при $U_{3C} = U_{3П} = 10$ В, времени разгона ЭП от задатчика интенсивности (ЗИ) $t_p = 0,2$ с. Для значений передаточных функций регуляторов рис. 2 и рис. 3 получено:

$$W_{PT\Phi 1}(p) = W_{PT\Phi 2}(p) = 0,1568;$$

$$W_{PT1}(p) = W_{PT2}(p) = \frac{428,49}{p}; W_{PC}(p) = \frac{(0,0226p + 1)}{0,0022p};$$

$$W_{PI}(p) = \frac{(0,1088p + 1)}{0,09p}; W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(0,0226p + 1)}.$$

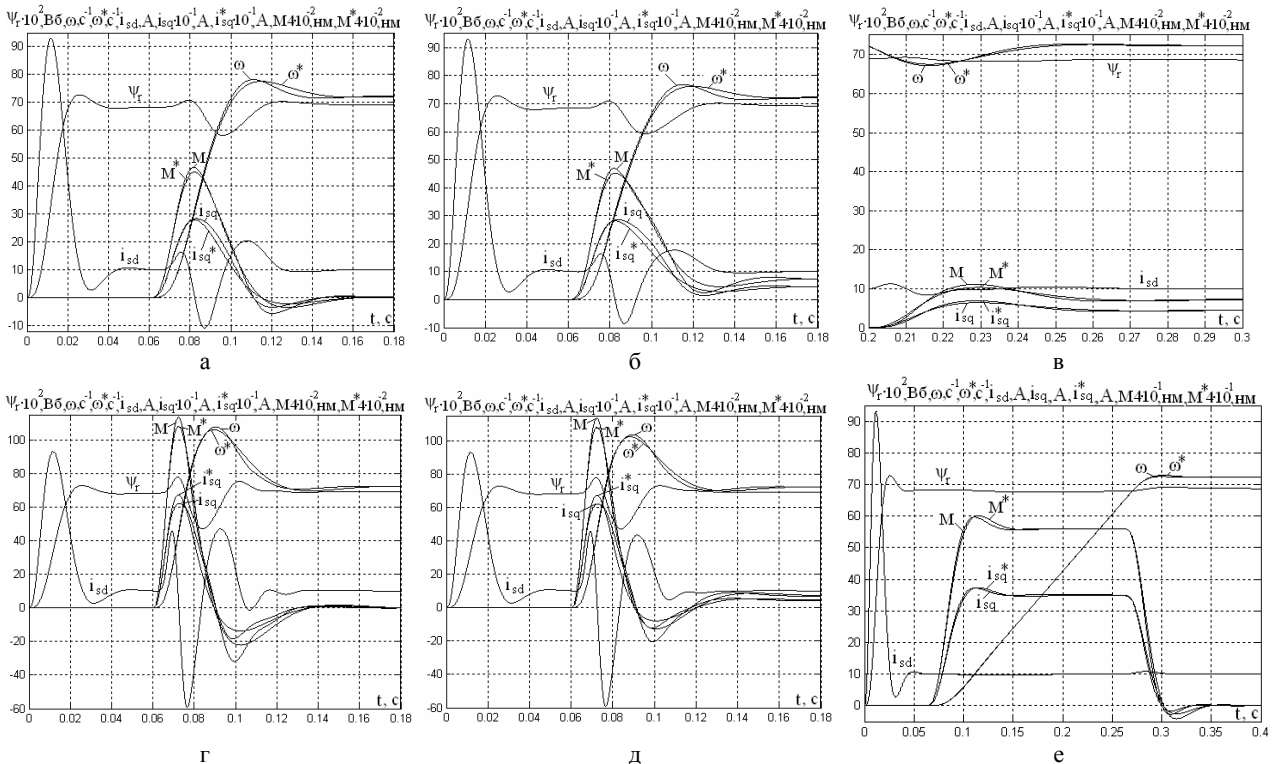


Рис. 4. Переходные процессы в системе векторного управления АД при компенсации всех обратных связей и автономном канале регулирования момента асинхронного электропривода

На рис. 4 представлены переходные процессы по скорости, токам и моменту одноканальной (ω^* , i_{sq}^* , M^*) и двухканальной (ω , i_{sq} , i_{sd} , M) структур. При моделировании систем с фильтром на входе были проведены следующие опыты: разгон на холостом ходу (а), наброс номинальной нагрузки во время разгона (б), наброс номинальной нагрузки в установившемся режиме (в). Результаты аналогичных опытов, но без фильтра показаны на рис. 4, г, д. Разгон ЭП на холостом ходу от задатчика интенсивности приведен на рис. 4, е.

Сравнительный анализ переходных процессов

скорости и тока на рис. 4 показал, что их характер приближается к стандартным и процессы для полной и одноканальной структур практически совпадают.

Таким образом, подтверждается практическая идентичность, представленной на рис. 3, модели автономного канала регулирования момента и скорости асинхронного ЭП полной двухканальной модели рис. 2 с компенсацией нелинейности и взаимовлияния каналов.

Остановимся на рассмотрении структурных схем механической части (МЧ) асинхронных ЭП. Примерами механизмов, где используются данные ЭП, яв-

ляются: шлифовальные станки, размоточно-намоточные механизмы, волочильные станы, спирально-винтовой транспортер, стенды для испытания механических характеристик АД, кинематическая пара колесо-рельс. Согласно многих литературных источников, например [7], такие механизмы могут быть представлены одномассовыми и двухмассовыми структурами механической части, которая в общем случае создает нелинейный характер нагрузки при существенном изменении момента инерции второй массы. Оговоренные структурные схемы приведены на рис. 5, где представлены: а, б – одномассовая и двухмассовая МЧ с постоянным моментом сопротивления; в, г – одномассовая и двухмассовая МЧ с нелинейным моментом сопротивления; Отметим, что в вариантах (в) и (г) отражены возрастающие и падающие участки нелинейной механической характеристики нагрузки.

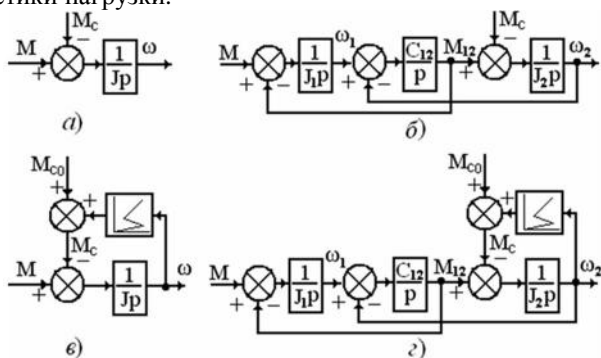


Рис. 5. Структурные схемы механической части асинхронного ЭП

Если принять, что падающий участок имеет отрицательную жесткость β_c , то последнее звено механической части ЭП представляется неминимально фазовой передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{Jp - \beta_c} = \frac{1/\beta_c}{T_c p - 1}, \quad (5)$$

где $T_c = J/\beta_c$ – механическая постоянная времени.

Наличие в структуре асинхронного ЭП звена с передаточной функцией (5) не позволяет традиционным методом синтеза СПР обеспечить требуемую динамику ЭП во всем диапазоне изменения J даже при переходе к рассмотрению от полной модели асинхронного ЭП с векторным управлением к одноканальной. Однако использование одноканальной структурной схемы рис. 3 позволяет применить методы полиномиальных уравнений и диаграмм качества управления, которые при комплексном применении должны способствовать улучшению динамики частотно-регулируемых ЭП.

ВЫВОДЫ

Обоснована возможность перехода к рассмотрению одноканальной структуры асинхронного ЭП при синтезе астатических регуляторов скорости. Наличие неминимально фазовых звеньев в структуре асинхронного ЭП не позволяет воспользоваться традиционными методами синтеза СПР во всем диапазоне изменения J , C_{12} , β_c . Для улучшения динамики рассматриваемых ЭП и синтеза их регуляторов рекомен-

дуется использовать методы полиномиальных уравнений и диаграмм качества управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуль А.И. Балансировка добротности и запаса устойчивости электромеханических систем // Электротехника. – 2003. – № 4. – С. 55-62.
2. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Клепиков В.Б., Пирожок А.В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой // Под общ. ред. В.Б. Клепикова. – Харьков: НТУ "ХПИ", Запорожье: ЗНТУ, 2002. – 160 с.
3. Слежановский О.В., Дацковский И.С., Кузнецов И.С. и др. Системы подчиненного регулирования электропривода переменного тока с вентильными преобразователями. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
4. Гуль А.И. Минимаксная оптимизация параметров ПИ-регуляторов на максимальный запас устойчивости электромеханических систем при повышенной добротности // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 25-29.
5. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона, 2001. – 320 с.
6. Крановое электрооборудование: Справочник. Алексеев Ю.В., Богославский А.П., Певзнер Е.М. и др. Под редакцией Рабиновича А.А. – М.: Энергия, 1979. – 314 с.
7. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. Перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

Bibliography (transliterated): 1. Gul A.I. Balancirovka dobrotnosti i zapaca ustoychivosti elektromehaničkih cistem // Elektrotehnika. - 2003. - № 4. - С. 55-62. 2. Akimov L.V., Dolbnja V.T., Klepikov V.B., Pirojok A.V. Cintež uprosčennih struktur dvuhmassovih elektroprivodov s neline'no' nagruzko' // Pod obsch. red. V.B. Klepikova. - Harkov: NTU "HPI", Zaporozje: ZNTU, 2002. - 160 s. 3. Clejanovskij O.V., Datskovskij I.C., Kuznetsov I.C. i dr. Cistem'i podchinennogo regulirovanija elektroprivoda peremennogo toka s ventil'imi preobrazovateljami. - M.: Energoatomizdat, 1983. - 256 s. 4. Gul A.I. Minimaksnaja optimizatsija parametrov PI-reguljatorov na maksimaln'i' zapac ustoychivosti elektromehaničkih cistem pri pov'ishenno' dobrotnosti // Elektrotehnika. - 1999. - № 5. - С. 25-29. 5. German-Galkin S.G. Kompjuterne modelirovanie poluprovodnikovih cistem v Matlab 6.0: Učebnoe pocobie. - SPb.: Korona, 2001. - 320 s. 6. Kranovoe elektrooborudovanie: Spravochnik. Alekseev JU.V., Bogoclavckij A.P., Pevzner E.M. i dr. Pod redaktsie' Rabinovicha A.A. - M.: Energija, 1979. - 314 s. 7. Ključev V.I. Teorija elektroprivoda: Učeb. dlja vuzov. - 2-e izd. Pererab i dop. - M.: Energoatomizdat, 2001. - 704 s.

Поступила 12.12.2010

Литвиненко Дмитрий Григорьевич, аспирант
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Автоматизированные электромеханические системы"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 707-64-45, e-mail: dilitne@mail.ru

Litvinenko D.G.

Mathematical models of a vector-controlled asynchronous drive for optimization problems via a polynomial method with control quality chart application.

The article considers mathematical models of a vector-controlled asynchronous electric drive for solving astatic speed regulator synthesis problems by a polynomial equations method and for parameter optimization with a complex criterion of maximum quality and stability factors for the drive dynamic characteristics improvement.

Key words – asynchronous electric drive models, vector control, astatic speed regulators, parameter optimization, dynamic characteristics.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕЗАВИСИМОМ ПИТАНИИ ЕГО ОБМОТОК

Сформульована математична модель лінійного електродвигуна, що відповідає режиму ударного силового імпульсу для збудження коливань земної кори при пошуку корисних копалин. Її особливістю є наявність нелінійних трьохпараметричних функцій диференціальних індуктивностей і взаємодіючих індуктивностей обмоток, а також електромагнітної сили взаємодії реактора і якоря.

Сформулирована математическая модель линейного электродвигателя, возбуждающего колебания земной коры при поиске полезных ископаемых, соответствующая режиму ударного силового импульса. Ее особенностью является наличие нелинейных трехпараметрических функций дифференциальных индуктивностей и взаимодутивных индуктивностей обмоток, а также электромагнитной силы взаимодействия реактора и якоря.

Введение. Линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД) рассматриваемого типа [1, 2] предназначен для создания в земной коре слабых сейсмических колебаний для поиска полезных ископаемых. Его конструкция и принцип действия представлены в [1-3], а здесь его упрощенная схема показана на рис. 1.

При подаче импульсов токов i_r и i_a в обмотки взаимодействие реактора и якоря порождает электромагнитную силу F_{em} . Якорь движется со скоростью v_a и через опорную плиту производит ударное воздействие на грунт, а инерционный реактор со скоростью v_r отскакивает вверх. За рабочий интервал взаимное перемещение якоря и реактора составляет примерно половину полюсного деления (полюсное деление τ_p – шаг между осями соседних зубцов якоря или реактора).

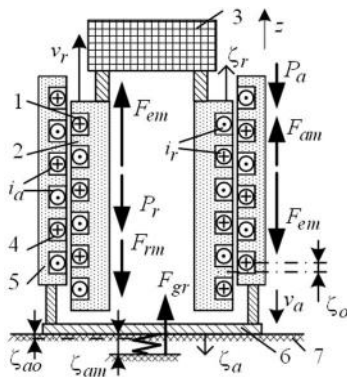


Рис. 1. Схема активной силовой части ЛИЭД: 1, 2, 3 – обмотка, сердечник и инерционная масса реактора; 4, 5, 6 – обмотка, сердечник и опорная плита якоря; 7 – грунт

Математическая модель и расчетный анализ ударного режима работы ЛИЭД были представлены в [2]. Там рассматривался вариант его питания от одного источника при последовательном соединении обмоток реактора и якоря. Однако с практической точки зрения может быть целесообразным и вариант с их независимым питанием от индивидуальных источников. Это позволяет понизить уровень напряжения ЛИЭД и всего электрооборудования в два раза и, тем самым, повысить электробезопасность в условиях эксплуатации и упростить систему электроизоляции.

Электрическая схема замещения ЛИЭД при независимом питании обмоток представлена на рис. 2,

где индексы r и a в обозначениях параметров соответствуют реактору и якорю.

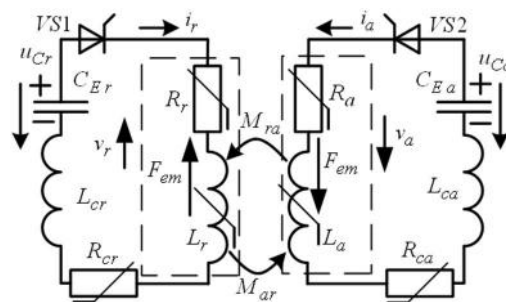


Рис. 2. Электрическая схема замещения ЛИЭД

Обмотки реактора и якоря представлены сопротивлениями R_r и R_a , индуктивностями L_r и L_a , а также через коэффициенты взаимной индуктивности M_{ra} и M_{ar} учитывается их магнитная связь. Все эти величины являются нелинейными. Сопротивления зависят от изменяющихся температур обмоток. Собственные и взаимные индуктивности являются сложными трехпараметрическими функциями, так как ввиду движения и наличия сильнонасыщенных ферромагнитных сердечников зависят от токов i_r и i_a , а также от взаимного смещения ζ реактора и якоря. В таких условиях должны использоваться исключительно дифференциальные параметры L_r , L_a , M_{ra} и M_{ar} , причем два последние, в отличие от линейных систем, могут отличаться друг от друга.

В схеме на рис. 2 представлены также сопротивления R_{cr} , R_{ca} с температурной нелинейностью и индуктивности L_{cr} , L_{ca} подводящих электрокабелей.

Конденсаторные накопители энергии имеют емкости C_{Er} , C_{Ea} и изменяющиеся напряжения

$$u_{Cr} = U_{Cro} - \frac{1}{C_{Er}} \int_0^t i_r dt; \quad u_{Ca} = U_{Cao} - \frac{1}{C_{Ea}} \int_0^t i_a dt, \quad (1)$$

где U_{Cro} , U_{Cao} – их начальные значения; t – время.

Инициализация работы ЛИЭД производится одновременной коммутацией тиристоров $VS1$ и $VS2$ в цепях обмоток реактора и якоря, они же исключают изменение направления токов в процессе работы.

Электромагнитные процессы в ЛИЭД неразрывно связаны с силовыми взаимодействиями.

Источником силовых процессов является упоминавшаяся сила F_{em} , которая в равной мере действует и на реактор, и на якорь, только в разные стороны (рис. 1). Эта сила также является трехпараметрической функцией, завися от токов i_r , i_a и взаимного аксиального смещения реактора и якоря ζ .

На реактор и якорь действуют также силы инерции $F_{mr} = m_r a_r$, $F_{ma} = m_a a_a$ и их весовые силы $P_r = m_r g_{gr}$, $P_a = m_a g_{gr}$, где m_r , m_a , a_r , a_a – массы и ускорение движения реактора и якоря; g_{gr} – гравитационная постоянная.

К важнейшим силам относится сила реакции упругого грунта F_{gr} , которая в условиях эксплуатации зависит от целого ряда слабо прогнозируемых факторов, поэтому ее адекватное определение в процессе расчета является практически невыполнимой задачей. Но для обеспечения расчетов ЛИЭД в [2] была принята гипотетическая зависимость силы $F_{gr}(\zeta_a)$ от осевого смещения якоря. В исходном положении $\zeta_a = 0$, а при ударном режиме работы имеет место максимальная деформация грунта на ζ_{am} . При этом F_{gr} достигает максимального значения F_{grm} , которое задается на основе тестовых расчетов ЛИЭД в зависимости от максимально возможной силы F_{em} .

Для прямого хода якоря с углублением опорной плиты в грунт была принята линейная зависимость $F_{gr} = k_{res1} \zeta_a$, где коэффициент упругости грунта $k_{res1} = F_{grm} / \zeta_{am}$. После ослабления силы F_{em} упругая сила F_{gr} отбрасывает якорь в исходное положение и на обратном ходе принята параболическая функция $F_{gr} = k_{res2} (\zeta_a - \zeta_{ao})^2$ с частично необратимой деформацией грунта ζ_{ao} , где коэффициент упругости грунта $k_{res2} = F_{grm} / (\zeta_{am} - \zeta_{ao})^2$.

Постановка задач исследования. Целью данной работы является представление математической модели, характеризующей рабочий импульсный режим рассматриваемого ЛИЭД с независимым питанием обмоток с учетом совокупности электромагнитных, механических и тепловых процессов, а также проведение расчетного анализа процесса работы для конкретного тестового варианта ЛИЭД.

Очевидно, что по сравнению с имеющимися аналогами таких разработок, но для ЛИЭД с последовательным питанием обмоток, задача многократно усложняется из-за наличия упоминавшихся трехпараметрических функций индуктивных параметров и электромагнитной силы, которые в аналогах были только двухпараметрическими.

Математическая модель ЛИЭД.

Электромагнитные процессы в рабочем режиме ЛИЭД в соответствии с его электрической схемой замещения (рис. 2) описываются уравнениями

$$\frac{d\Psi_r}{dt} + L_{Cr} \frac{di_r}{dt} = u_{Cr} - u_{Rr}; \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_a}{dt} + L_{Ca} \frac{di_a}{dt} = u_{Ca} - u_{Ra}, \quad (3)$$

где Ψ_r , Ψ_a – результирующие магнитные потокоцепления (МПС) обмоток реактора и якоря, складывающиеся из собственных и взаимных МПС; $u_{Rr} = i_r(R_r + R_{Cr})$, $u_{Ra} = i_a(R_a + R_{Ca})$ – падения напряжения на соответствующих сопротивлениях.

С учетом трехпараметрических зависимостей МПС их производные преобразуются к виду

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{\partial\Psi_r}{d\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_r} \cdot \frac{di_r}{dt} + \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt}; \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = \frac{\partial\Psi_a}{d\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_r} \cdot \frac{di_r}{dt}. \quad (5)$$

В этих выражениях выделим дифференциальные собственные и взаимные индуктивности

$$L_r = \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_r}; L_a = \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_a}; M_{ra} = \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_a}; M_{ar} = \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_r}, \quad (6)$$

а также коэффициенты, которые для удобства оперирования назовем условно индуктивностями движения

$$L_{r\zeta} = \frac{\partial\Psi_r}{d\zeta}; L_{a\zeta} = \frac{\partial\Psi_a}{d\zeta}. \quad (7)$$

Обозначим временные производные токов через $i_r' = di_r/dt$, $i_a' = di_a/dt$, а также скорость взаимного перемещения реактора и якоря $v_{ra} = d\zeta/dt$, которая составляется из их индивидуальных скоростей $v_{ra} = v_r + v_a$.

Теперь можно оперировать с ЭДС самоиндукции и взаимной индукции

$$e_{Lr} = L_r i_r'; e_{La} = L_a i_a'; e_{Mra} = M_{ra} i_a'; e_{Mar} = M_{ar} i_r', \quad (8)$$

а также с ЭДС движения

$$e_{vr} = L_{r\zeta} v_{ra}; e_{va} = L_{a\zeta} v_{ra}. \quad (9)$$

В итоге уравнения (2), (3) представляются в виде

$$(L_r + L_{Cr}) \cdot i_r' + M_{ra} \cdot i_a' = u_{Cr} - u_{Rr} - e_{vr}; \quad (10)$$

$$M_{ar} \cdot i_r' + (L_a + L_{Ca}) \cdot i_a' = u_{Ca} - u_{Ra} - e_{va}. \quad (11)$$

Тепловой процесс в обмотках и кабелях в течение кратковременного рабочего импульса можно считать адиабатическим. Тогда температуры и сопротивления их медных проводников определяются по формулам

$$T_e = T_{eo} + \frac{1}{c_{pe} m_{Cue}} \int_0^t R_e i_e^2 dt, \quad (12)$$

$$R_e = R_{eo} [1 + \alpha_{pe} (T_e - T_{eo})], \quad (13)$$

где индекс e подразумевает соответствующие параметры проводника каждого из названных элементов; m_{Cue} , c_{pe} , T_{eo} , R_{eo} , α_{pe} – их массы, удельная теплоемкость, исходные температуры и соответствующие сопротивления, температурный коэффициент сопротивления.

Баланс сил в механической системе ЛИЭД (рис. 1) описывается на основе уравнений

$$F_{em} = P_r + F_{mr}; F_{em} = F_{ma} + F_{gr} - P_a, \quad (14)$$

из которых получаются ускорения и скорости движения реактора и якоря и их аксиальные смещения:

$$a_r = F_{em} / m_r - g_{gr}; a_a = (F_{em} - F_{gr}) / m_a + g_{gr}, \quad (15)$$

$$v_r = \int_0^t a_r dt; v_a = \int_0^t a_a dt, \quad (16)$$

$$\zeta_r = \int_0^t v_r dt; \zeta_a = \int_0^t v_a dt, \quad (17)$$

что и дает их взаимное смещение

$$\zeta = \zeta_r + \zeta_a + \zeta_o, \quad (18)$$

где ζ_0 – начальное смещение реактора в сторону, противоположную его движению из положения "нейтрала", когда зубцы и пазы реактора и якоря расположены посередине друг друга, т.е. $\zeta_0 < 0$ [1, 2].

Принципы подготовки и работа с трехпараметрическими функциями

Для решения системы всех представленных уравнений и соотношений необходимы трехпараметрические функции МПС $\Psi_r(\zeta, i_r, i_a)$, $\Psi_a(\zeta, i_r, i_a)$ и электромагнитной силы $F_{em}(\zeta, i_s, i_a)$. Их подготовка, а также оперирование с частными производными МПС, оказались наиболее сложной частью расчета переходного процесса, характеризующего импульсный рабочий режим ЛИЭД. Принципы преодоления этой проблемы заложены в [2, 4], но теперь задача еще многократно усложнилась ввиду перехода от двух- к трехпараметрическим функциям.

Как и в [2, 4], функции $\Psi_r(\zeta, i_r, i_a)$, $\Psi_a(\zeta, i_r, i_a)$ и $F_{em}(\zeta, i_s, i_a)$ были подготовлены численно-полевыми расчетами методом конечных элементов по программе FEMM [5] с учетом реальной геометрии, "коллекторной" шихтовки и насыщения сердечников. Было определено, что для получения достаточно "гладких" функций должно хватить структуры сочетаний из $K_\zeta = 10$ значений ζ и по $K_{ir} = K_{ia} = 12$ значений i_r и i_a , т.е. общее число сочетаний составило $(10 \times 12 \times 12)$ или 1440, на что сравнительно эффективному компьютеру (2,8 ГГц) потребовалось около 22 часов расчетного времени. Естественно, что "ручная" организация перебора вариантов и "извлечения" результатов расчета были неприемлемы, а с задачей справилась управляющая программа, написанная на алгоритмическом языке Lua [5].

Для получения в ходе расчета переходного процесса конкретных значений F_{em} и дифференциальных индуктивных параметров $L_r, L_a, M_{ra}, M_{ar}, L_{r\zeta}$ и $L_{a\zeta}$ при текущих значениях ζ, i_r и i_a использовалась локальная аппроксимация табличных функции кубическими полиномами отдельно по каждому из аргументов при фиксировании двух других аргументов, подобно тому, как это делалось для двухпараметрической функции [4]. Рассмотрим это на примере более трудного варианта – МПС, так как для него надо определять не сами значения, а частные производные по трем параметрам (4)-(7).

Как уже представлено, имеется трехмерный массив МПС (индексы r или a при Ψ уберем, т.к. для МПС реактора и якоря действия, в принципе, аналогичны):

$$\Psi_{n,j,i}, n=1..K_\zeta, j=1..K_{ir}; i=1..K_{ia}, \quad (19)$$

которому соответствовали одномерные массивы перемещений и токов

$$\zeta_n, n=1..K_\zeta; i_r, j=1..K_{ir}; i_a, i=1..K_{ia}. \quad (20)$$

Для иллюстраций структуру полученного массива (19) представим фрагментарно на рис. 3 в виде трехкоординатной сеточной структуры, где координаты линий соответствуют (20), а узлы – (19).

Предположим, что в процессе расчета определены значения ζ, i_r и i_a , а для продолжения расчета необходимы частные производные (6), (7). Для этого предлагается следующая процедура, основанная на аппроксимации функции $\Psi(\zeta, i_r, i_a)$ однокоординат-

ными кубическими полиномами. На рис. 3 точка с указанными координатами помечена кружочком и попала внутрь ячейки в виде параллелепипеда, левый нижний ближний угол которого идентифицируется тройным номером n, j, i .

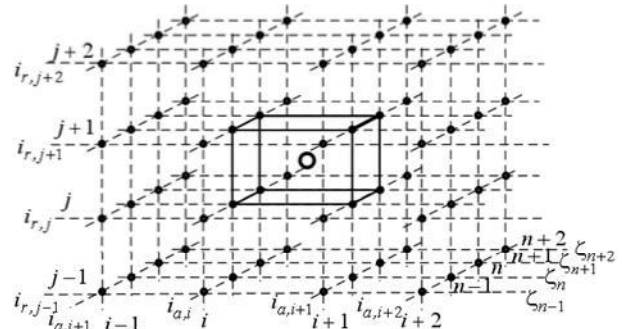


Рис. 3. Условная структура массивов для определения производных МПС и электромагнитных сил

Сначала из структуры на рис. 3 возьмем одну плоскость с фиксированным номером n (рис. 4,а). На горизонтальной линии с номером j в пределах отрезка между номерами i и $i+1$ предполагаем кубический полином

$$\Psi = a + b \cdot i_a + c \cdot i_a^2 + d \cdot i_a^3. \quad (21)$$

Значения коэффициентов a, b, c, d получим, используя четыре значения МПС из массива (19) в прилегающих узлах на пересечении линии j с линиями $i-1, i, i+1, i+2$ и на основе (21) составим систему алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} a + b \cdot i_{a,i-1} + c \cdot i_{a,i-1}^2 + d \cdot i_{a,i-1}^3 &= \Psi_{n,j,i-1}; \\ a + b \cdot i_{a,i} + c \cdot i_{a,i}^2 + d \cdot i_{a,i}^3 &= \Psi_{n,j,i}; \\ a + b \cdot i_{a,i+1} + c \cdot i_{a,i+1}^2 + d \cdot i_{a,i+1}^3 &= \Psi_{n,j,i+1}; \\ a + b \cdot i_{a,i+2} + c \cdot i_{a,i+2}^2 + d \cdot i_{a,i+2}^3 &= \Psi_{n,j,i+2}. \end{aligned} \quad (22)$$

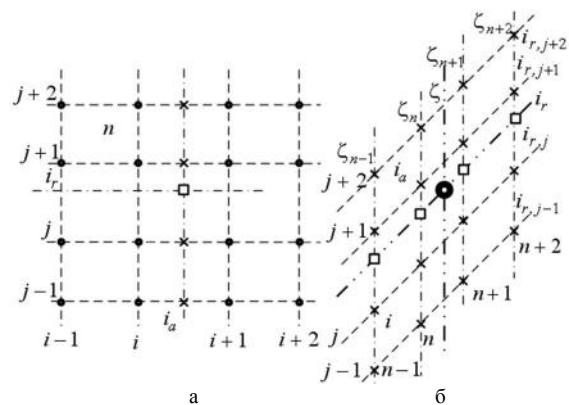


Рис. 4. Частные одноплоскостные структуры элементов массивов

Решив систему алгебраических уравнений (22) по (21) находим значение МПС в точке при значении i_a (крестик) и здесь же производную по i_a

$$\Psi_{n,j,i_a} = a + b \cdot i_a + c \cdot i_a^2 + d \cdot i_a^3; \quad (23)$$

$$(\Psi'_{n,j,i_a})_{i_a} = b + 2 \cdot c \cdot i_a + 3 \cdot d \cdot i_a^2. \quad (24)$$

Проделав все то же на линиях $j-1, j+1, j+2$, получим значения МПС и его производной в наборе точек, отмеченных на рис. 4,а крестиками, а именно,

$$\Psi_{n,j-1,ia}; \Psi_{n,j,ia}; \Psi_{n,j+1,ia}; \Psi_{n,j+2,ia}; \quad (25)$$

$$(\Psi'_{n,j-1,ia})_{ia}; (\Psi'_{n,j,ia})_{ia}; (\Psi'_{n,j+1,ia})_{ia}; (\Psi'_{n,j+2,ia})_{ia} \cdot (26)$$

Теперь на вертикальной линии (рис. 4,а) с точками, отмеченными крестиками, в пределах отрезка между номерами j и $j+1$ со значением i_r предполагается свой полином со своими коэффициентами a, b, c, d

$$\Psi = a + b \cdot i_r + c \cdot i_r^2 + d \cdot i_r^3. \quad (27)$$

Для четырех указанных точек составляется система алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} a + b \cdot i_{r,j-1} + c \cdot i_{r,j-1}^2 + d \cdot i_{r,j-1}^3 &= \Psi_{n,j-1,ia}; \\ a + b \cdot i_{r,j} + c \cdot i_{r,j}^2 + d \cdot i_{r,j}^3 &= \Psi_{n,j,ia}; \\ a + b \cdot i_{r,j+1} + c \cdot i_{r,j+1}^2 + d \cdot i_{r,j+1}^3 &= \Psi_{n,j+1,ia}; \\ a + b \cdot i_{r,j+2} + c \cdot i_{r,j+2}^2 + d \cdot i_{r,j+2}^3 &= \Psi_{n,j+2,ia}. \end{aligned} \quad (28)$$

После ее решения получаются значения a, b, c, d и подстановкой их и конкретного значения тока i_r в (27) получаем МПС $\Psi_{n,ir,ia}$ в точке, помеченной на рис.4,а квадратиком. Здесь же из (27) получается производная МПС по i_r

$$(\Psi'_{n,ir,ia})_{ir} = b + 2 \cdot c \cdot i_r + 3 \cdot d \cdot i_r^2. \quad (29)$$

Полином и система уравнений, аналогичных (27) и (28), составляются для производной МПС по i_a , т.е.

$$(\Psi')_{ia} = a + b \cdot i_r + c \cdot i_r^2 + d \cdot i_r^3; \quad (30)$$

$$\begin{aligned} a + b \cdot i_{r,j-1} + c \cdot i_{r,j-1}^2 + d \cdot i_{r,j-1}^3 &= (\Psi'_{n,j-1,ia})_{ia}; \\ a + b \cdot i_{r,j} + c \cdot i_{r,j}^2 + d \cdot i_{r,j}^3 &= (\Psi'_{n,j,ia})_{ia}; \\ a + b \cdot i_{r,j+1} + c \cdot i_{r,j+1}^2 + d \cdot i_{r,j+1}^3 &= (\Psi'_{n,j+1,ia})_{ia}; \\ a + b \cdot i_{r,j+2} + c \cdot i_{r,j+2}^2 + d \cdot i_{r,j+2}^3 &= (\Psi'_{n,j+2,ia})_{ia}. \end{aligned} \quad (31)$$

В итоге по (30) в точке (квадратик) на рис. 4,а при фиксированных значениях i_r и i_a получается значение производной МПС по i_a , т.е. $(\Psi'_{n,ir,ia})_{ia}$.

Действия от (21) до (31) выполняются на рис. 3 во всех плоскостях того же типа, как на рис. 4,а при замене номера n на $n-1, n+1$ и $n+2$. Таким образом, в точках, отмеченных на рис. 4,б квадратиками, получаются четверки значений МПС и его производных

$$\Psi_{n-1,ir,ia}; \Psi_{n,ir,ia}; \Psi_{n+1,ir,ia}; \Psi_{n+2,ir,ia}; \quad (32)$$

$$(\Psi'_{n-1,ir,ia})_{ia}; (\Psi'_{n,ir,ia})_{ia}; (\Psi'_{n+1,ir,ia})_{ia}; (\Psi'_{n+2,ir,ia})_{ia}; \quad (33)$$

$$(\Psi'_{n-1,ir,ia})_{ir}; (\Psi'_{n,ir,ia})_{ir}; (\Psi'_{n+1,ir,ia})_{ir}; (\Psi'_{n+2,ir,ia})_{ir}. \quad (34)$$

На линии с этими значениями (рис. 4,б) в точке с координатой ζ (точка обозначена увеличенным кружочком) с использованием уже изложенных действий в итоге получаются значения частных производных по трем параметрам i_r, i_a и ζ , а именно

$$(\Psi'_{\zeta,ir,ia})_{\zeta}; (\Psi'_{\zeta,ir,ia})_{ir}; (\Psi'_{\zeta,ir,ia})_{ia}. \quad (35)$$

Если в качестве функции МПС Ψ использовать МПС реактора Ψ_r , то в соответствии с (6) и (7) получим $L_r = (\Psi'_{r,\zeta,ir,ia})_{ir}$; $M_{ra} = (\Psi'_{r,\zeta,ir,ia})_{ia}$; $L_{r\zeta} = (\Psi'_{r,\zeta,ir,ia})_{\zeta}$; если Ψ_a , то $M_{ar} = (\Psi'_{a,\zeta,ir,ia})_{ir}$; $L_a = (\Psi'_{a,\zeta,ir,ia})_{ia}$; $L_{a\zeta} = (\Psi'_{a,\zeta,ir,ia})_{\zeta}$. Очевидно, что эти значения для конкретного сочетания параметров i_r, i_a и ζ получены по 64 зна-

чениям каждой из функций ВМП в окружающих узлах из массивов (19).

Оперирование с функцией силы $F_{em}(\zeta, i_s, i_a)$ производится аналогично, но с меньшими затратами, так как в этом случае требуется найти только значения F_{em} , а не частных производных.

Примеры зависимости МПС и силы F_{em} от тока обмоток и величины ζ есть в [2, 3]. Иллюстрация частных зависимостей индуктивных параметров обмоток ЛИЭД от взаимного аксиального смещения якоря и реактора дана на рис. 5-7. Здесь каждая из кривых соответствует конкретному сочетанию токов обмоток, хотя вместо токов использованы более универсальные величины – МДС, приходящиеся на паз реактора $F_{n,r}$ и якоря $F_{n,a}$, которые связаны с токами простыми соотношениями

$$F_{n,r} = i_r N_n / a_p; F_{n,a} = i_a N_n / a_p, \quad (36)$$

где N_n, a_p – одинаковые для обеих обмоток числа витков в пазу и параллельных ветвей.

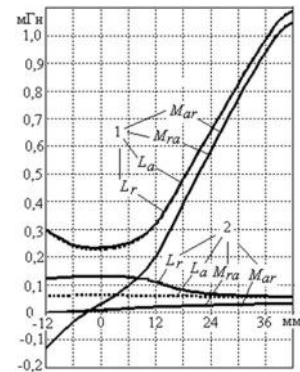


Рис. 5. Зависимость индуктивных параметров обмоток ЛИЭД от взаимного смещения реактора и якоря: 1 – $F_{n,r} = 0$; $F_{n,a} = 0$; 2 – $F_{n,r} = 100$ кА

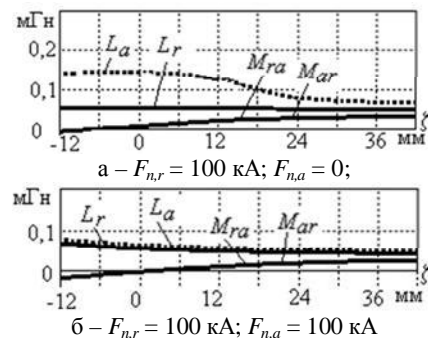


Рис. 6. Варианты зависимости индуктивных параметров обмоток от взаимного смещения ζ

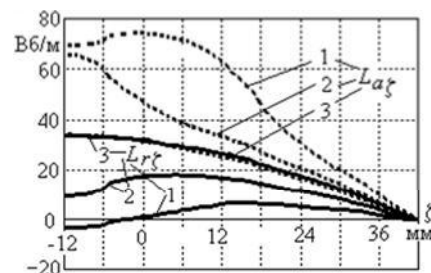


Рис. 7. Варианты зависимости индуктивностей движения обмоток от взаимного смещения ζ при сохранении $F_{n,r} = 100$ кА и 1 – $F_{n,a} = 0$; 2 – $F_{n,a} = 50$ кА; 3 – $F_{n,a} = 100$ кА

Указанные значения МДС 100 кА соответствуют достигаемым при работе ЛИЭД максимумам токов. Значение $\zeta = -12$ мм соответствует ζ_0 [6], $\zeta = 0$ – положение на геометрической "нейтральной", $\zeta = 42$ мм – совмещение зубцов реактора и якоря.

Из рисунков очевидна явно выраженная нелинейность всех индуктивных параметров и их сильная зависимость как от взаимного смещения реактора и якоря, так и от величин и соотношения их токов.

Представленная математическая модель, с учетом подготовленных данных и принципов оперирования с нелинейными дифференциальными индуктивными параметрами, позволила перейти к созданию алгоритма и программы расчета и проведению расчетного анализа рабочего режима ЛИЭД. В основу этого положено численное решение системы дифференциальных уравнений (10), (11) с использованием метода Рунге-Кутты 4 порядка в совокупности с комплексом остальных уравнений и соотношений. В целом это подобно представленному в [2], но теперь надо оперировать с парой производных токов из (10), (11)

$$\dot{i}'_a = \frac{\Delta a}{\Delta ar}; \dot{i}'_r = \frac{\Delta r}{\Delta ar}, \quad (37)$$

где общий и частные определители имеют вид

$$\Delta ar = (L_r + L_{cr}) \cdot (L_a + L_{ca}) - M_{ra} \cdot M_{ar};$$

$$\Delta r = (u_{Cr} - u_{Rr} - e_{vr})(L_a + L_{ca}) - (u_{Ca} - u_{Ra} - e_{va})M_{ra};$$

$$\Delta a = (u_{Ca} - u_{Ra} - e_{va})(L_r + L_{cr}) - (u_{Cr} - u_{Rr} - e_{vr})M_{ar}.$$

Тестовый расчет и его результаты.

Конструктивные параметры ЛИЭД в целом соответствуют представленному в [1-6], то есть зазор между сердечниками реактора и якоря – 2 мм; диаметр по зазору – 416 мм; длина сердечников – 533 мм; $N_n = 14$; $a_p = 3$; $m_a = 750$ кг; $m_r = 1500$ кг, общая высота – около 2,6 м. Но в связи с изменением схемы электропитания обмоток для обеспечения того же режима используются новые параметры конденсаторов: $U_{Cro} = U_{Cao} = 600$ В; $C_{Er} = C_{Ea} = 0,17$ Ф, т.е. соединенные ранее последовательно конденсаторы и обмотки теперь работают независимо.

Функции, характеризующие протекание переходного процесса в рабочем интервале, даны на рис.8-9. В этом интервале графики ζ_a и v_a показывают, что якорь осуществил свое ударное действие и вернулся в исходное состояние: $\zeta_a = 0$ и $v_a = 0$.

Функции даны в относительных единицах (о.е.), но для числовой оценки назовем их максимальные значения: токи i_r и $i_a - I_{rmax} = 21,3$ кА, $I_{amax} = 19,2$ кА; сила $F_{em} - F_{emm} = 1013$ кН, сила $F_{gr} - F_{grm} = 1695$ кН; скорости реактора $v_r - v_{rm} = 4,26$ м/с и якоря $v_a - v_{am} = 2,65$ м/с; ускорения реактора $a_r - a_{rm} = 665$ м/с² и якоря $a_a - a_{am} = 822$ м/с²; сдвиг якоря $\zeta_a - \zeta_{am} = 11,3$ мм; сдвиг реактора еще продолжается. Для прочих величин дадим масштабы – значения на 1 о.е.: L_r и $M_{ra} - 0,1$ мГн; для всех напряжений и ЭДС – 150 В. Заметим, что ряд графиков дан только для величин, относящихся к реактору. Для якоря они близки к ним, отличаясь примерно в той степени, как u_{Ca} и u_{Cr} .

Главными функциональными параметрами ЛИЭД считаются амплитуда механической силы F_{emm} , дли-

тельность действия t_{iem} и импульс этой силы [1, 2, 6]

$$S_{em} = \int_0^{t_{iem}} F_{em}(t) \cdot dt. \quad (38)$$

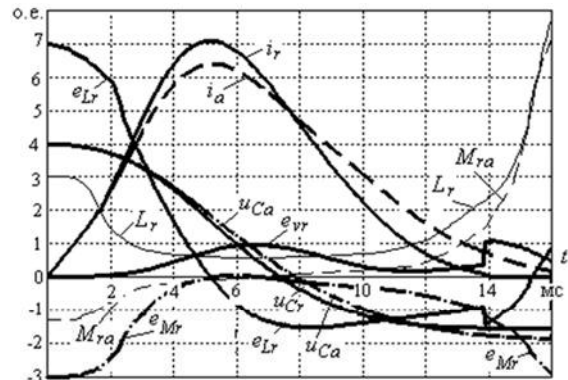


Рис. 8. Временные функции электрических величин

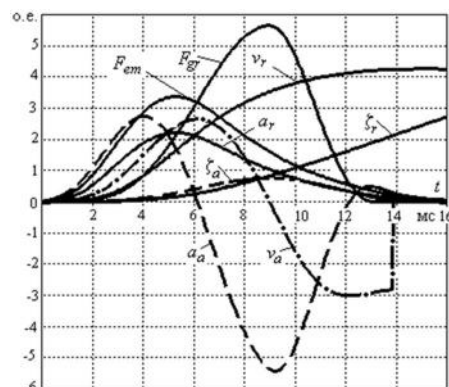


Рис. 9. Временные функции механических величин

Но более объективную оценку дает введенный нами [2, 6] импульс силового воздействия непосредственно на грунт

$$S_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} dt, \quad (39)$$

где t_{img+} – время действия силы F_{gr} до того момента, пока якорь еще движется в грунт (т.е. на рис. 1 и рис. 9 пока еще $v_a > 0$).

Условный КПД ЛИЭД $\eta = W_{gr}/W_{el}$, где механическая энергия деформации грунта – $W_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} v_a dt$;

отданная конденсаторами электрическая энергия

$$W_{el} = 0,5[C_{Er}(U_{Cro}^2 - U_{Crel}^2) + C_{Ea}(U_{Cao}^2 - U_{Carel}^2)], \quad (40)$$

U_{Crel} , U_{Carel} – остаточные их напряжения. Получено $S_{em} = 6557$ Н·с; $S_{gr} = 5469$ Н·с; $\eta = 0,198$, длительности импульсов (по [2]) для токов i_r и $i_a - 12,5$ и 15 мс; для сил F_{em} и $F_{gr} 13,1$ и 9,4 мс.

За один рабочий режим нагрев обмоток оказывается менее 1°C, несмотря на значительный максимум плотности тока – порядка 134 А/мм². Но при многократном повторении импульсов с периодом $T_{imp} = 6$ с нагревы становятся значительно больше.

Отметим, что полученные электросиловые параметры рабочего ударного режима ЛИЭД при последовательной схеме включения обмоток и двух конден-

саторов [2, 6] по значениям и характеру изменения достаточно близки к полученным здесь. В частности общий для обмоток ток достигал 20,1 кА; сила $F_{em} - F_{emm} = 1008$ кН, сила $F_{gr} - F_{grm} = 1690$ кН.

Выводы.

Представленная математическая модель является достаточно уникальной, так как основана на использовании сложных нелинейных трехпараметрических функций МПС, дифференциальных индуктивностей и взаимоиндуктивностей и электромагнитной силы. Эта модель позволяют эффективно исследовать динамический импульсный режим работы ЛИЭД с независимым включением обмоток реактора и якоря, предназначенного для возбуждения в земной коре слабых сейсмических колебаний. Ее усложняющим фактором также является совокупность взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко С.В., Мильх В.И. Выбор типа и основных параметров линейного импульсного электродвигателя для невзрывных сейсмоисточников // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – № 3. – С. 41-44.
2. Мильх В.И., Ткаченко С.В. Алгоритмизована математическая модель линейного импульсного электродвигателя как ударного источника слабых сейсмических колебаний // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 1. – С. 33-38.
3. Мильх В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 6. – С. 36-39.
4. Мильх В.И., Ткаченко С.В. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потокосцепления // *Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського*. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Вип.3/2010(62). Ч. 2. – С. 70-73.
5. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>, 2005.
6. Мильх В.И., Ткаченко С.В. Анализ влияния механических параметров линейного электродвигателя на эффективность его работы как источника сейсмических колебаний // *Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.* – 2010. – Вип. 85 – С. 124-130.

Bibliography (transliterated): 1. Baru JU.A., Melnik A.K., Tkachenko C.V., Mil'ih V.I. V'ibor tipa i osnovn'ih parametrov line'nogo impul'nogo elektrodvigatelja dlja nevzr'ivn'ih se'cmoichtochnikov // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2008. - № 3. - С. 41-44. 2. Mil'ih V.I., Tkachenko C.V. Algoritmizirovannaja matematičeskaja model line'nogo impul'nogo elektrodvigatelja kak udarnogo istochnika slab'ih se'cmičeckih kolebani' // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2011. - №1. - С. 33-38. 3. Mil'ih V.I., Tkachenko C.V. Cilov'ie vzaimode'ctvija v line'nom elektrodvigatele dlja istochnikov se'cmičeckih kolebani' // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2008. - № 6. - С. 36-39. 4. Mil'ih V.I., Tkachenko C.V. Matematičeskoe obešpečenie čislennogo analiza impul'nogo vzbujdenija line'nogo elektrodvigatelja s dvuhparametričeskoj funktsiej magnitnogo potokocseplenija // *Vicnik Kremenčut'skogo derjavnogo univercitetu im. M. Ostrogradckogo*. - Kremenčuk: KDU. - 2010. - Vip.3/2010(62). CH. 2. - С. 70-73. 5. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual. September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de/>, 2005. 6. Mil'ih V.I., Tkachenko C.V. Analiz vlijanija mehaničeskih parametrov line'nogo elektrodvigatelja na effektivnoct ego raboti kak istochnika se'cmičeckih kolebani' // *Girn. elektromehanika ta avtomatika: Nauk.-tehn. zb.* - 2010. - Vip. 85 - С. 124-130.

Поступила 10.03.2011

*Мильх Владимир Иванович, д.т.н., проф.,
Ткаченко Сергей Валериевич*
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электрические машины"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 707-65-14; e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Milykh V.I., Tkachenko S.V.

Mathematical model and analysis of the impulsive mode of operations of linear electric motor at the independent feed of his windings.

A linear electric motor is intended for excitation of vibrations of the earth's crust at the search of minerals. His mathematical model is formulated. She corresponds the mode of shock power impulse. Its feature is a presence of nonlinear functions of differential own and mutual inductances windings. These functions depend on three parameters. The same is function of electromagnetic force which operates on a reactor and anchor.

Key words — linear impulsive electric motor, mathematical model, own and mutual inductance, electromagnetic force, functions of three parameters.

ГІБРИДНИЙ КОНТАКТОР З ДОДАТКОВИМИ РУХОМИМИ КОНТАКТАМИ

Запропоновано гібридний контактор, у контактну систему якого додатково уведений рухомий контакт, що забезпечує відсутність гальванічного зв'язку мережі з навантаженням у вимкненому стані контактора, що, в свою чергу, дозволяє суттєво розширити галузі застосування гібридних контакторів.

Предложен гибридный контактор, в контактную систему которого дополнительно введен подвижный контакт, что обеспечивает отсутствие гальванической связи сети с нагрузкой в выключенном состоянии контактора, что, в свою очередь, позволяет существенно расширить область применения гибридных контакторов.

ВСТУП

Гібридні контактори, які поєднують позитивні якості як контактних апаратів (малі втрати потужності у вимкненому стані), так і безконтактних (бездугова комутація кола), які мають комутаційну зносостійкість, що наближується до механічної, починають витискувати звичайні контактори в умовах використання, де останні не задовольняють жорстким вимогам, що до них пред'являються. Для того, щоб сформулювати мету нашого дослідження, проведемо короткий аналіз кращих зразків гібридних контакторів.

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ГІБРИДНИХ КОНТАКТОРІВ, ЇХ НЕДОЛІКИ

Відомий гібридний контактор змінного струму, що здійснює бездугову комутацію, кожний полюс якого містить головні контакти, силовий безконтактний ключ, що складається з двох керованих безконтактних елементів (тиристорів), трансформатора струму (датчика струму), причому первинна обмотка трансформатора з'єднана послідовно з головними контактами, а силовий безконтактний ключ, приєднаний паралельно до них, та схему керування силовим безконтактним ключем, вхідні електроди малопотужного транзисторного ключа якої, через змінний резистор і випрямляч з ємнісним фільтром приєднані до вторинної обмотки трансформатора струму, а вихідні електроди цього транзисторного ключа через обмежуючий резистор та запобіжник підключені між анодною та катодною групою діодів випрямного моста, при цьому кожний з катодів діодів анодної групи приєднаний до керуючих електродів силового безконтактного ключа, а кожен з анодів катодної групи приєднаний до його протилежних вихідних електродів [1]. Цей контактор надійно забезпечує бездугову комутацію кіл змінного струму як при вмиканні, так і при його вимиканні, має прийнятну масу і габарити.

Його недоліком є те, що у вимкненому стані апарату через навантаження протікає струм витоку силового безконтактного ключа, який може сягати кількох десятків міліампер, тобто навантаження і мережа не мають гальванічного розв'язку. Через те цей контактор не можна застосовувати в електричному транспорті, крановому електрообладнанні й у вибухо- та пожежо-безпечному середовищі. Тому галузі застосування цього контактора суттєво обмежуються.

Також відомий гібридний двополосний контактор постійного струму, що містить у кожному полюсі по одному головному контакту, які відрегульовані з

можливістю розмикання другого головного контакту пізніше розмикання першого, реле струму (датчик струму), увімкнене послідовно з першим головним контактом, повністю керований силовий безконтактний (напівпровідниковий) ключ, наприклад двоопераційний тиристор або IGBT-транзистор, увімкнений паралельно реле струму й першому головному контакту, та схему керування [2].

У цього контактора за рахунок застосування другого полюсу з головним контактом зі спеціально відрегульованим зазором виключено гальванічний зв'язок між мережею та навантаженням у вимкненому стані. Але це досягається суттєвим підвищенням габаритів і вартості виробу, а також зниженням надійності його роботи, і якщо для бездугової комутації кіл постійного струму це технічне рішення є прийнятним, то очевидно, що для бездугової комутації кіл змінного струму (звичайно трифазних) його застосування не є доцільним.

Проблема гальванічного розв'язку мережі та навантаження також розв'язана у гібридному контакторі змінного струму, кожний полюс якого містить головні контакти, що складаються з нерухомого й рухомого контактів, силовий безконтактний ключ, який складається з двох зустрічно-паралельно увімкнених тиристорів, відокремлюючи контакти з послідовно підключеним запобіжником, через які силовий безконтактний ключ підключений паралельно головним контактам, схему керування, що складається з керуючих контактів і обмежуючого резистора, зашунтованого конденсатором, при цьому керуючі електроди тиристорів через керуючі контакти й обмежуючий резистор з'єднані між собою [3].

У цьому контакторі виключення протікання струму витоку силового безконтактного ключа через навантаження у вимкненому стані досягається шляхом введення у кожний полюс апарату додаткових сильнострумних відокремлюючих контактів і слабкострумних керуючих контактів. При цьому при вмиканні спочатку замикаються відокремлюючі контакти, далі керуючі, потім головні, а при вимиканні спочатку розмикаються головні контакти, далі керуючі, а потім через проміжок часу не менше півперіоду струму головного кола – відокремлюючі контакти. Це технічне рішення суттєво збільшує масу, габарити і вартість виробу і знижує надійність роботи контактора через збільшення контактних кіл утрічі, до того ж охоплених достатньо складним кінематичним зв'язком.

Метою даного дослідження є удосконалення гібридного контактора, в якому введення нових конструктивних елементів і зв'язків дозволило б забезпечити бездугову комутацію кіл як змінного, так і постійного струмів, виключити протікання струмів витoku силового безконтактного ключа через навантаження у вимкненому стані контактора, і за рахунок цього знизити трудомісткість виготовлення, масу, габарити й вартість, а також підвищити його надійність.

Поставлена мета зумовлена тим, що у відомих гібридних контакторах, які містять силовий безконтактний ключ, підключений паралельно головним контактам, або не виключене протікання струму витoku силового безконтактного ключа через навантаження у вимкненому стані, або воно виключене за допомогою таких технічних рішень, реалізація яких веде до суттєвого підвищення маси, габаритів і вартості контактора, а також зниження надійності його роботи.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОПОНОВАНОГО ГІБРИДНОГО КОНТАКТОРА

Поставлена мета вирішується тим, що у гібридний контактор, який містить у кожному полюсі головні контакти, кожен з яких складається з нерухомого і рухомого контактів, силовий безконтактний ключ і схему керування, додатково введені у кожний полюс датчик струму, підключений послідовно з головними контактами з боку нерухомого контакту, додатковий рухомий контакт, розташований над рухомих головним контактом, верхній і нижній кінці якого виконані з матеріалу, що не проводить струм, два упори, які також виконані з матеріалу, що не проводить струм, один з яких крізь отвір у рухомому головному контакті упирається в нижній кінець додаткового рухомого контакту, а другий через другий отвір в рухомому головному контакті – у верхній кінець того ж контакту та дві пружини, що стискаються, які надягнуті на вказані упори, кожен з кінців цих пружин жорстко закріплений з одного боку з частиною, яка не проводить струм, додаткового рухомого контакту, а з іншого – з рухомих головним контактом у місці, де його пронизує упор, при цьому силовий безконтактний ключ підключений одним виводом до вихідного затискача контактора з боку нерухомого головного контакту, а другим – до гнучкого виводу від додаткового рухомого контакту.

Один полюс удосконаленого гібридного контактора показано на рис. 1, при цьому на рис. 1,а його схему, а на рис. 1,б – ескіз конструкції головних контактів у вимкненому стані [4].

Цей контактор містить у кожному полюсі головні контакти, кожен з яких складається з нерухомого і рухомого контактів, відповідно 1 і 2, силовий безконтактний ключ 3 і схему керування 5. У контактор додатково введені у кожний полюс датчик струму 4, підключений послідовно з головними контактами з боку нерухомого контакту 1, додатковий рухомий контакт 6, розташований над рухомих головним контактом 2, верхній і нижній кінці, відповідно 7 і 8, якого виконані з матеріалу, що не проводить струм, два упори 9 і 10, які також виконані з матеріалу, що не проводить струм, один з яких, наприклад 9, у відкрито-

ченому стані контактора проникаючи крізь отвір 11 у рухомому головному контакті 2 упирається в нижній кінець 8 додаткового рухомого контакту, а 10 через отвір 12 в рухомому головному контакті 2 – у верхній кінець 7 того ж контакту та дві пружини 13 і 14, що стискаються, які надягнуті на вказані упори, кожен з кінців цих пружин жорстко закріплений з одного боку з частиною, яка не проводить струм, додаткового рухомого контакту 6, а з іншого – з рухомих головним контактом 2 у місці, де його пронизує упор. При цьому силовий безконтактний ключ 3 підключений одним виводом до вихідного затискача 15 контактора з боку нерухомого головного контакту 1, а другим – до гнучкого виводу 16 від додаткового рухомого контакту 6, і який пронизує рухомий головний контакт 2 через отвір 17.

На рис.1 в якості силового безконтактного ключа 3 можуть бути застосовані два зустрічно-паралельно підключені тиристори в контакторах змінного струму, або один повністю керований напівпровідниковий прилад, наприклад IGBT- транзистор або двоопераційний тиристор, в контакторах постійного струму. В якості датчика струму 4 в контакторах змінного струму може застосовуватись трансформатор струму, а в контакторах постійного струму – реле струму.

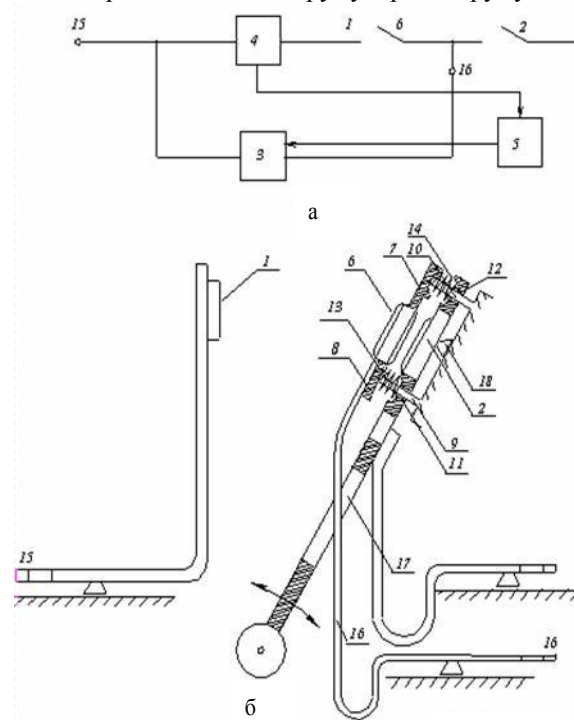


Рис. 1

У вимкненому стані контактора рухомий головний контакт 2 під дією поворотної пружини, яка не показана на рисунку, доведений до упору 18, а додатковий рухомий контакт 6 відділений від нього за допомогою упорів 9 і 10. В результаті силовий безконтактний ключ 3 буде гальванічно не зв'язаний з напругою мережі, а на рухомий головний контакт 2 буде діяти сила, що дорівнює різності сил поворотної пружини й пружин 13 і 14.

У ввімкненому стані контактора коло головних контактів замкнене і по ньому протікає струм наван-

таження. Датчик струму 4 виробляє сигнал, що діє на схему керування 5 таким чином, що вона виробляє керуючий сигнал на вмикання силового безконтактного ключа 3, однак через мале падіння напруги на ділянці кола нерухомий головний контакт 1 і додатковий рухомий контакт 6, струм у коло силового безконтактного ключа 3 відгалужуватися не буде.

При вимиканні контактора при розімкненні контактів 1 і 6 між ними виникає "коротка" дуга з напругою порядку 10-12 В під дією якої безконтактний ключ 3 вмикається і струм з кола цих контактів переходить до його кола. Звичайно цей процес триває кілька десятків мікросекунд і тому практично не приводить до зносу контактів. При повному перетіканні струму з кола нерухомого головного контакту 1 й додаткового рухомого контакту 6 датчик струму 4 діє на схему керування таким чином, що вона припиняє подавати сигнал на вмикання силового напівпровідникового ключа в контакторах змінного струму і продукує з фіксованою затримкою сигнал на вимикання силового безконтактного ключа 3 в контакторах постійного струму. Тривалість цієї затримки обирається такою, щоб до моменту вимикання силового безконтактного ключа забезпечити необхідну електричну міцність контактної проміжки між контактами 1 і 6, які розходяться. Тривалість же затримки до моменту розмикання контактів 6 і 2 повинна бути достатньою, щоб за цей проміжок відбулося надійне вимикання напівпровідникового ключа, тобто були забезпечені умови бездугового розмикання контактів 6 і 2. Указана тривалість в нашому випадку визначається швидкістю руху контактів, що розходяться, і висотою упорів 9 і 10 і звичайно для надійної роботи контактора повинна перевищувати на 30-40 % тривалість півхвилі напруги мережі у колах змінного струму і тривалість затримки на вимикання силового безконтактного ключа 3 в колах постійного струму. Оскільки в існуючих контакторах час розмикання контактів головного кола складає кілька десятків мс, то дану умову достатньо просто виконати. Після закінчення розмикання головних контактів живлюча мережа й навантаження будуть електрично не зв'язані, а силовий безконтактний ключ буде також відключений від мережі.

Методика розрахунку основних вузлів цього контактора наведена в [3].

ВИСНОВКИ

1. У запропонованому гібридному контакторі, що виконаний на рівні винаходу, суттєво підвищений рівень його безпеки в умовах експлуатації за рахунок виключення протікання через навантаження струмів витоку силового безконтактного ключа, що сягають кількох десятків міліампер у вимкненому стані контактора, завдяки введенню в коло головних контактів додаткового рухомого контакту, розташованого над рухомим контактом, що забезпечує відключення від мережі силового безконтактного ключа в цьому стані апарату.

2. Також за рахунок спрощення конструкції шляхом скорочення додаткових контактних кіл і виключення складних кінематичних зв'язків у них суттєво знижені габарити й маса контактора, а також підви-

щена надійність його роботи.

3. Запропонований гібридний контактор може працювати з приводом будь якого типу в колах змінного і постійного струму, на відміну від існуючих апаратів цього типу він допускається до роботи в умовах з підвищеними вимогами до пожежо- й вибухонебезпеки, тобто може успішно експлуатуватися в таких галузях промисловості, як вугільна, газо- й нафтопереробна, хімічна, електричний транспорт тощо.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 22023 Україна. МПК⁸ H01H 9/30, H01H 9/54. Гібридний контактор змінного струму / А.Г. Сосков, Н.О. Рак, І.О. Соскова. – № u2006 11929; заявл. 13.11.06; опубл. 10.04.07, Бюл. № 4.
2. Пат. 33171 Україна. МПК⁸ H01H 9/30, H01H 9/54. Гібридний двополосний контактор постійного струму / А.Г. Сосков, Н.О. Сабалаєва, І.О. Соскова. – № u2008 01870; заявл. 13.02.08; опубл. 10.06.08, Бюл. №11.
3. Сосков А.Г. Полупроводниковые аппараты: коммутация управление, защита: учеб. для студ. вузов / А.Г.Сосков, И.А.Соскова; под ред. А.Г.Соскова. – К.: Каравелла, 2005. – 344 с.
4. Пат. 51691 Україна. МПК H01H 9/30, H03K 17/56, H01H 33/59. Гібридний контактор / А.Г.Сосков, І.О.Соскова, Н.О.Сабалаєва, Я.Б.Форкун. № u2010 01532, заявл. 15.02.10, – опубл. 26.07.10, Бюл. № 14.

Bibliography (transliterated): 1. Pat. 22023 Ukraine. MPK8 H01H 9/30, H01H 9/54. Gibridni' kontaktor zminnogo strumu / A.G. Cokkov, N.O. Rak, I.O. Cokkova. - №u2006 11929; zajavl. 13.11.06; opubl. 10.04.07. Bjul. № 4. 2. Pat. 33171 Ukraine. MPK8 N01N 9/30, N01N 9/54. Gibridni' dvopoljucni' kontaktor postinogo strumu / A.G. Cokkov, N.O. Cabalaeva, I.O. Cokkova. - № u2008 01870; zajavl. 13.02.08; opubl. 10.06.08, Bjul. №11. 3. Cokkov A.G. Poluprovodnikov'ie apparati: kommutatsija upravlenie, zaschita: ucheb. dlja stud. vuzov / A.G.Cokkov, I.A.Cokkova; pod red. A.G.Cokkova. - K.: Karavella, 2005. - 344 c. 4. Pat. 51691 Ukraine. MPK N01N 9/30, N03K 17/56, N01H 33/59. Gibridni' kontaktor / A.G.Cokkov, I.O.Cokkova, N.O.Cabalaeva, JA.B.Forkun. № u2010 01532, zajavl. 15.02.10, - opubl. 26.07.10, Bjul. № 14.

Надійшла 20.12.2010

*Сосков Анатолій Георгійович, д.т.н., проф.,
Дорохов Олександр Володимирович, к.т.н.,
Сабалаєва Наталія Олегівна,
Форкун Яна Борисівна, к.т.н., доц.*
Харківська національна академія міського господарства
кафедра теоретичної і загальної електротехніки
61002, Харків, вул. Революції, 12
тел. (057) 707-31-11

Соскова Інна Олексіївна, к.т.н., доц.
Українська інженерно-педагогічна академія
кафедра теоретичної і загальної електротехніки
61003, Харків, вул. Університетська, 16
тел. (057) 733-79-73

*Soskov A.G., Dorohov O.V., Sabalaeva N.O., Soskova I.O.,
Forkun J.B.*

A hybrid contactor with a subsidiary movable contact.

A hybrid contactor with a subsidiary movable contact to provide zero galvanic coupling between the current network and load in the contactor off mode is proposed, which allows essentially expanding hybrid contactor application field.

Key words – hybrid contactor, movable contact, zero galvanic coupling.

О СЕЛЕКТИВНОЙ РАБОТЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПРИ ВНУТРЕННЕМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

У статті приведений аналіз впливу параметрів запобіжника та контуру короткого замикання на селективну роботу запобіжників у напівпровідниковому перетворювачі.

В статтє приведен анализ влияния параметров предохранителя и контура короткого замыкания на селективную работу предохранителей в полупроводниковом преобразователе.

Интенсивный толчок производству быстродействующих предохранителей дало широкое применение силовой полупроводниковой техники, вследствие чего возникла необходимость защиты полупроводниковых вентилях от токов короткого замыкания. В ряде устройств быстродействующие предохранители являются основной или даже единственной токовой защитой [1].

Основная особенность предохранителей, предназначенных для защиты полупроводниковых вентилях, связана с весьма сильной чувствительностью полупроводниковых приборов к перегрузкам. Поэтому наряду с высокой разрывной способностью к предохранителям данного типа предъявляются такие требования, как селективность и отсутствие опасных перенапряжений. Чаще всего эти требования противоречивы и нелегко разрабатывать предохранители с комплексом всех требуемых характеристик. Так, например, обеспечение высокого быстродействия, достигаемого использованием достаточно высокой плотности тока в плавком перешейке, находится в полном противоречии с требованием надёжной работы предохранителя в продолжительном режиме. Достижение короткого времени гашения дуги связано с необходимостью получения высокого напряжения на дуге, однако, очень большое перенапряжение может привести к пробоем полупроводниковых вентилях. Поэтому напряжения не должны превышать вполне определенных величин.

Как показал обзор литературных источников и патентных материалов, в последнее время предложено большое количество оригинальных идей, конструктивных и схемных решений, связанных с улучшением технико-экономических показателей быстродействующих предохранителей. Однако, анализ выпускаемых в настоящее время промышленностью конструкций быстродействующих предохранителей показывает, что по ряду причин, в первую очередь, экономического, технологического и эксплуатационного характера, большая часть предложенных идей и конструктивных решений не получила промышленной реализации.

Основным типом быстродействующих предохранителей, используемых в промышленности, являются предохранители с серебряными ленточными плавкими элементами, имеющими суженные части (перешейки), и кварцевым наполнителями с высокой степенью его уплотнения, которые по своим технико-экономическим характеристикам более полно, чем другие типы быстродействующих предохранителей,

удовлетворяют требованиям защиты полупроводниковых вентилях.

Под селективностью понимают координацию рабочих характеристик двух или нескольких аппаратов защиты от сверхтоков таким образом, что при возникновении сверхтоков аппарат, предназначенный срабатывать в этих условиях срабатывает, в то время как другие аппараты не срабатывают [2]. Селективная работа предохранителей предполагает также, что из ряда последовательно включенных в цепь предохранителей один полностью отключает цепь аварийного тока раньше, чем плавкие элементы остальных предохранителей будут подвергнуты повреждениям (расплавлению и подплавлению перешейков, окислению материала плавкого элемента, подрыву под действием электродинамических сил и т.п.) [3]. Следствием этих повреждений в полупроводниковых преобразователях, защищаемых предохранителями, является преждевременный выход из строя большого количества предохранителей.

Требования к селективности срабатывания предохранителей общепромышленного применения заключается в том, чтобы при одном и том же аварийном токе предохранитель меньшего номинального тока, установленный ближе к месту короткого замыкания, например, у электродвигателя, срабатывал быстрее, чем расплавится плавкий элемент предохранителя большего номинального тока, установленного, например, на фидере. При этом преследуется цель бесперебойного питания объектов, включенных параллельно с тем, где произошло короткое замыкание.

В преобразовательной установке требования к селективности срабатывания быстродействующих предохранителей, как и преследуемые при этом цели, несколько иные и определяются особенностями схемы их включения. Предохранитель в поврежденной ветви должен отключить цепь раньше, чем расплавятся плавкие элементы предохранителей плеча с неповрежденными вентилями, т.е. в быстродействующих предохранителях условие селективности выполняется при определенных соотношениях между временем срабатывания и временем плавления предохранителей одного и того же номинального тока.

Таким образом, в отличие от селективного срабатывания предохранителей в общепромышленных электроустановках, селективное срабатывание быстродействующего предохранителя обеспечивает непрерывность работы преобразователя, в котором произошло короткое внутреннее замыкание.

Выбор предохранителей при защите преобразовательных установок с полупроводниковыми выпрямителями по условиям селективности их срабатывания имеет ряд особенностей, связанных как с видами и параметрами схемы, так и с местом включения предохранителя. На рисунке показана схема трехфазного преобразовательного моста с тремя параллельными цепочками полупроводниковый прибор – предохранитель в момент, когда выпрямительный ток проходит в нагрузку через плечи 2 и 4. Если в этот момент один из вентиляй, например, плеча 5 потеряет запирающие свойства, то возникает внутреннее короткое замыкание в цепи. Предохранитель с поврежденной ветви оказывается включенными с n параллельными такими же предохранителями. Авария будет ликвидирована и преобразователь продолжит свою нормальную работу, если плавкие элементы здорового плеча с неповрежденными вентилями не успеют расплавиться, пока предохранитель в поврежденной ветви полностью отключит цепь.

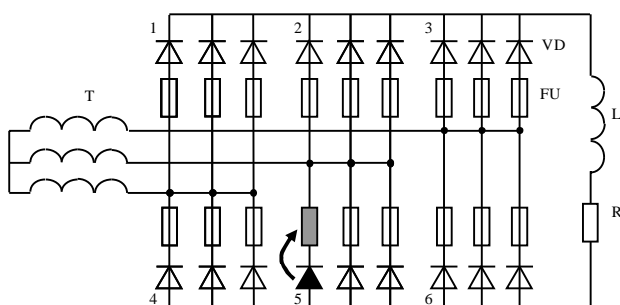


Схема внутреннего короткого замыкания в трехфазном мостовом полупроводниковом выпрямителе

Как известно [3], основное назначение быстродействующих предохранителей для защиты полупроводниковых вентиляй заключается, с одной стороны, в селективном отключении только поврежденной ветви и в обеспечении, таким образом, бесперебойной работы преобразователя. С другой стороны, в случае общей аварии, охватывающей все параллельные ветви, отключение преобразователя должно осуществляться фидерным автоматом без срабатывания индивидуальных предохранителей вентиляй защиты. В связи с этим, защита преобразователя должна одновременно обеспечивать быстродействие и селективность при достаточной надежности работы, т.е. удовлетворять требованиям, противоречащим друг другу.

Существует несколько видов селективности. Одним из важнейших является селективность между самими предохранителями при внутреннем коротком замыкании в преобразователе. Такой вид селективности регламентирует связь между полным интегралом Джоуля или интегралом отключения (operational Joule integral – I^2t_o) и преддуговым интегралом Джоуля (pre-arcing Joule integral – I^2t_p) предохранителя в виде

$$I^2t_o \leq [n \cdot (1 - p) + p]^2 \cdot I^2t_p, \quad (1)$$

где n – число параллельных ветвей преобразователя; p – коэффициент неравномерности распределения тока между ветвями преобразователя, определяющий отклонение тока в данной ветви относительно номинального значения.

Например, $p = 0,1$ означает, что ток в данной ветви преобразователя может составлять 1,1 или 0,9 номинального значения. При $p = 0$ токи между ветвями преобразователя распределяются равномерно. Из (1) следует, что увеличение n и уменьшение p облегчают обеспечение селективности. Наиболее трудно достичь селективности при $n = 2$. Если такая селективность будет достигнута, то при всех $n > 2$ селективность будет автоматически обеспечиваться. Параметры n и p определяются внешними условиями работы предохранителя в преобразователе.

Однако существует весьма важные внутренние факторы, определяющие соответствие между интегралами отключения и преддуговыми в зависимости от конструкции предохранителя. Параметры же n и p фактически задают предельные соответствия между этими интегралами, допустимые для предохранителя в данном агрегате. Например, при $p = 0,3$ (обычно $p = 0,1 \div 0,4$) и $n = 2$ условие (1) удовлетворяется, если интеграл отключения предохранителя превышает преддуговой интеграл не более чем в 2,89 раза, при $p = 0,2$ и $n = 2$ не более чем в 4 раза, при $n = 3$ – в 9 раз, $n = 4$ – 16 и $n = 5$ – в 25 раз. Влияние параметров предохранителя и контура короткого замыкания на селективность проанализируем для различных значений ожидаемого тока короткого замыкания I_k (среднеквадратичное значение) и начальной фазы короткого замыкания ψ .

Для анализа преддугового этапа воспользуемся системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\frac{di}{dt} = (u_c - R \cdot i - u_n) / L \quad (2)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{1}{S_x} \cdot \frac{dS_x}{dx} \right) + i^2 \cdot \rho / (c \cdot \gamma \cdot S_x^2) \quad (3)$$

где u_c – мгновенное значение напряжения источника питания, В; R – активное сопротивление контура, Ом; i – мгновенное значение тока, А; t – время, с; L – индуктивность контура, Гн; u_n – мгновенное значение напряжения на предохранителе, В; ϑ – мгновенное значение температуры перешейка, °С; a – коэффициент температуропроводности, определяемый соотношением $a^2 = \lambda / c \cdot \gamma$, см² / с; S_x – сечение плавкого элемента по координате x , см²; x – координата по длине плавкого элемента, см; λ – коэффициент теплопроводности материала плавкого элемента, Вт/(см·°С); c – удельная теплоемкость, Дж / (Г·°С); γ – удельная плотность, Г / см³; ρ – удельное электрическое сопротивление материала плавкого элемента, Ом·см.

Первое уравнение приведенной системы – это уравнение баланса напряжений электрической цепи. Второе – уравнение нагрева перешейка. Как показали проведенные исследования, для режима КЗ можно пренебречь теплоотдачей с поверхности плавкого элемента в кварцевый наполнитель, корпус и далее в окружающую среду, учитывая только теплоотдачу от перешейка в широкую часть плавкого элемента.

Для анализа дугового этапа использовалась система дифференциальных уравнений, состоящая из уравнения (2) и уравнения объема выгорания материала плавкого элемента:

$$V = C \cdot \left(\frac{1}{m} \cdot \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt \right)^N \quad (4)$$

где C и N – эмпирические коэффициенты (из расчета на один перешеек), зависящие от материала плавкого элемента и условий горения дуги; V – суммарный объем выгоревшего материала плавкого элемента, см³; t_1 – время образования дуги, с; t_2 – время гашения дуги и отключения электрической цепи, с; m – число параллельных перешейков, определяющих сечение плавкого элемента.

Исследовались быстродействующие плавкие предохранители на номинальный ток 630 А, номинальное напряжение 660 В.

Плавкий элемент имел следующие параметры: материал плавкого элемента – серебро; δ – толщина плавкого элемента – 0,01 см; b_0 – ширина перешейка – 0,015 см; d_0 – диаметр отверстия, которыми образуются параллельные перешейки – 0,15 см; n – число последовательных перешейков – 4; l – расстояние между соседними последовательными перешейками – 1,0 см; m – число параллельных перешейков – 73.

Таблица 1. Расчетные значения интегралов Джоуля

ψ	I_k	$I^2 t_p \cdot 10^3$	$I^2 t_o \cdot 10^3$	A_1	I_k	$I^2 t_p \cdot 10^3$	$I^2 t_o \cdot 10^3$	A_1	I_k	$I^2 t_p \cdot 10^3$	$I^2 t_o \cdot 10^3$	A_1
0	10	94,5	463	4,90	100	94,9	485	5,11	200	95,1	414	4,35
0,3		94,5	462	4,89		95,0	573	6,03		95,2	508	5,34
0,6		94,5	457	4,84		94,8	702	7,41		95,3	683	7,17
0,9		94,5	432	4,57		95,0	812	8,58		95,5	836	8,75
1,2		94,5	383	4,05		95,2	865	9,09		95,6	925	9,68
1,5		94,5	304	3,22		95,3	847	8,89		95,7	927	9,69

Снижение U_c относительно номинального напряжения предохранителя улучшает селективность работы [3]. Повышение номинального тока предохранителей (увеличение сечения S) практически не изменяет условий селективности между предохранителями, однако улучшает селективность предохранителей с фидерными выключателями при сохранении номинального тока фидерных выключателей. Это объясняется тем, что одновременно с увеличением преддугового интеграла Джоуля из-за увеличения сечения перешейков возрастает также и дуговой интеграл Джоуля. В конечном счете, соотношение между полным интегралом Джоуля (интегралом отключения) и джоулевым преддуговым интегралом Джоуля в общем не изменяется. Однако соотношения между полным интегралом Джоуля (интегралом отключения) фидерного выключателя и преддуговым интегралом Джоуля предохранителя в этом случае изменяется из-за увеличения последнего при росте номинального тока предохранителя и неизменности первого в случае сохранения номинального тока фидерного выключателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Глух Е.М., Зеленев В.Е. Защита полупроводниковых преобразователей. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
2. IEC 60050-441: 1984, Amendment 1: 2000-07. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 441: Switchgear, controlgear and fuses. – 118 p.

Параметры контура короткого замыкания выбирались для трех значений токов с соответствующими коэффициентами мощности:

- 1) $I_k = 10$ кА; $\cos \varphi = 0,3$;
- 2) $I_k = 100$ кА; $\cos \varphi = 0,1$;
- 3) $I_k = 200$ кА; $\cos \varphi = 0,1$.

При этом среднеквадратичное значение напряжения источника U_c принималось равным 730 В, коэффициент неравномерности p – равным нулю, а начальная фаза ψ изменялась в пределах $0 \dots 1,5$ рад.

Результаты расчета по методике, представленной в [4], приведены ниже в таблице 1, где $A_1 = I^2 t_o / I^2 t_p$, при $n = 1$.

Анализ результатов расчета позволил сделать следующие выводы. В то время, как преддуговой интеграл Джоуля определяется сечением перешейков, дуговой интеграл Джоуля зависит главным образом от угла ψ и от тока контура. Отношение A_1 изменяется в широких пределах от 3,20 до 9,70, что не обеспечивает селективности работы предохранителей при $n = 2$ и 3. Условия селективности при $n = 4$ для предохранителей этого типа удовлетворяется во всем диапазоне изменения I_k .

3. Намитокон К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280с.

4. Фомин В.И. Расчет процесса отключения быстродействующими предохранителями токов короткого замыкания. Вестник НТУ "ХПИ". – 2005. – № 36.

Bibliography (transliterated): 1. Gluh E.M., Zelenov V.E. Zashchita poluprovodnikov'ih preobrazovatelei'. - M.: Energija, 1970. - 152 s. 2. IEC 60050-441: 1984, Amendment 1: 2000-07. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Chapter 441: Switchgear, controlgear and fuses. - 118 p. 3. Namitokov K.K., Ilina N.A., Shklovskii I.G. Apparat' i dlja zashchit'i poluprovodnikov'ih ustro'itv. - M.: Energoatomizdat, 1988. - 280s. 4. Fomin V.I. Raschet protsecca otkljuchenija b'itrode'ctvu-juschimi predohraniteljami tokov korotkogo zam'ikanija. Vestrnik NTU "HPI". - 2005. - № 36.

Поступила 14.12.2010

Fomin V.I.

On selective operation of protection device in a semiconductor converter under internal short.

The paper analyzes action of protection device and short circuit loop parameters on selective operation of protection device in a semiconductor converter.

Key words – semiconductor converter, internal short circuit, protection device, selective operation.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОСТІ СТРУМІВ ЛІНІЙНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ВХІДНОМУ І ВИХІДНОМУ СТРУМАМ ЙОГО СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ

Показано, що рівняння лінійного трансформатора можна розглядати як систему рівнянь, складену по методу контурних струмів, якщо вважати струми в обмотках контурними струмами, встановлено, що даній системі відповідає така ж схема заміщення трансформатора з усуненими індуктивними зв'язками, що і розроблена раніше, доведено, що вхідний і вихідний струми схеми заміщення рівні відповідно вхідному і вихідному струмам лінійного трансформатора.

Показано, что уравнения линейного трансформатора можно рассматривать как систему уравнений, составленную по методу контурных токов, если считать токи в обмотках контурными токами, установлено, что данной системе соответствует такая же схема замещения трансформатора с устранёнными индуктивными связями, что и разработанная ранее, доказано, что входной и выходной токи схемы замещения равны соответственно входному и выходному токам линейного трансформатора.

Вступ. Трансформатор є одним з найважливіших з усіх відомих електротехнічних елементів. Він застосовується по суті в кожному електротехнічному пристрої. За допомогою трансформатора не тільки здійснюється перетворення електромагнітної енергії змінного струму, але і проводиться ізолювання в електричному відношенні одного електричного кола від іншого, крім того, включення трансформатора між джерелом і приймачем енергії дозволяє здійснити їх узгодження.

Заміна електричного кола трансформатора еквівалентним колом з усуненими індуктивними зв'язками, використовується для вивчення електромагнітних процесів лінійного трансформатора, і широко застосовується при розробці, проектуванні, розрахунку електротехнічних пристроїв, що містять даний компонент (трансформатор). Отже, еквівалентні схеми заміщення трансформатора без індуктивних зв'язків мають велике теоретичне і практичне значення.

Неадекватність описуваних у відповідних розділах ТОЕ схем заміщення з усуненими індуктивними зв'язками електромагнітним процесам лінійного трансформатора показана в роботах [1-3]. В цих статтях розроблена схема заміщення трансформатора, що не містить індуктивно зв'язаних елементів, електромагнітні процеси якої описуються тими ж рівняннями що і процеси лінійного трансформатора. В роботі [1] досліджена структура схеми заміщення ідеального трансформатора, що дозволяє наочно з'ясувати дію закону електромагнітної індукції. В статті [2] одержана схема заміщення лінійного трансформатора відповідно до загальної теорії Умова, що описує процес перетворення електромагнітної енергії. За допомогою теорії чотириполюсників в роботі [3] одержана така ж структура схеми заміщення лінійного трансформатора, що і в попередніх публікаціях [1, 2].

Таким чином, дослідження схеми заміщення лінійного трансформатора з усуненими індуктивними зв'язками з метою встановлення еквівалентності її вхідного і вихідного струмів відповідно вхідному і вихідному струмам трансформатора є актуальною проблемою. Її рішення підтверджує достовірність одержаних результатів в роботах [1-3], спрощує вивчення електромагнітних процесів трансформатора, і підвищує точність розрахунку електротехнічних пристроїв, що містять лінійний трансформатор.

Основна частина. Повна система рівнянь трансформатора в лінійному режимі, що описує його електромагнітні процеси, представляється двома рівняннями [4] для струмів первинного і вторинного контурів (обмоток) (рис. 1)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 + \dot{E}_{2M} = \dot{I}_1(R_1 + j\omega L_1) \\ \dot{E}_{1M} = (R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_2 + \dot{U}_2 \end{cases}, \quad (1)$$

де $\dot{E}_{1M} = -j\omega M\dot{I}_1$ – е. р. с. взаємоіндукції, створювана струмом первинної обмотки; $\dot{E}_{2M} = -j\omega M\dot{I}_2$ – е. р. с. взаємоіндукції, обумовлена струмом вторинної обмотки; $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_H$ – напруга на навантаженні трансформатора.

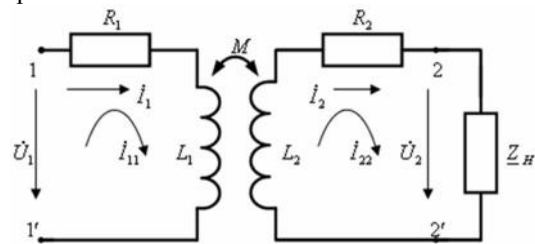


Рис. 1

Отже, вищенаведена система рівнянь лінійного трансформатора може бути записана таким чином:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 - j\omega M\dot{I}_2 = \dot{I}_1(R_1 + j\omega L_1) \\ -j\omega M\dot{I}_1 = (R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_2 + Z_H\dot{I}_2 \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + Z_M \dot{I}_2 \\ 0 = Z_M \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 + Z_H \dot{I}_2 \end{cases}, \quad (2)$$

де $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ – комплексний опір первинної обмотки; $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$ – комплексний опір вторинної обмотки; $Z_M = j\omega M$ – комплексний опір взаємної індуктивності лінійного трансформатора.

Систему рівнянь (1) можна розглядати як систему рівнянь електричного кола з двома контурними струмами за відсутності в такому колі індуктивних зв'язків між вітками або контурами. Для цього необхідно припустити, що в первинній обмотці трансформатора діє контурний струм \dot{I}_{11} рівний її струму \dot{I}_1 , а

у вторинній - контурний струм I_{22} рівний струму I_2 вторинної обмотки. При цьому система рівнянь (2), що описує електромагнітні процеси лінійного трансформатора, перетвориться в рівняння, складені по методу контурних струмів [5]:

$$\begin{cases} \dot{E}_{11} = \dot{I}_{11}Z_{11} + Z_{12}\dot{I}_{22} \\ \dot{E}_{22} = Z_{21}\dot{I}_{11} + Z_{22}\dot{I}_{22} \end{cases}, \quad (3)$$

де $\dot{E}_{11} = \dot{U}_1$ - контурна е. р. с. першого контуру; $\dot{E}_{22} = 0$ - контурна е. р. с. другого контуру; $Z_{11} = R_1 + j\omega L_1 = Z_1$ - власний опір першого контуру рівний опору первинної обмотки трансформатора; $Z_{22} = R_2 + j\omega L_2 + Z_H = Z_{2H}$ - власний опір другого контуру рівний сумі опорів вторинної обмотки трансформатора і його навантаження; $Z_{12} = Z_{21} = j\omega M = Z_M$ - загальний опір між контурами (першим і другим).

Напрями і величини струмів первинної і вторинної обмоток визначаються напругою, діючою на вході трансформатора, оскільки трансформатор є простим електричним колом. Отже, і його схема заміщення, що не містить індуктивних зв'язків, те ж повинна бути простою. Струми вхідної і вихідної вітки даної схеми рівні струмам первинної і вторинної обмоток відповідно, а їх напрями задаються вхідною напругою схеми заміщення трансформатора. Тому в схемі заміщення опір вітки загальної для двох контурів повинен бути рівний $-Z_M = -j\omega M$.

Таким чином, системі рівнянь (3) відповідає електрична схема заміщення лінійного трансформатора, що не містить індуктивно зв'язаних елементів, зображена на рис. 2.

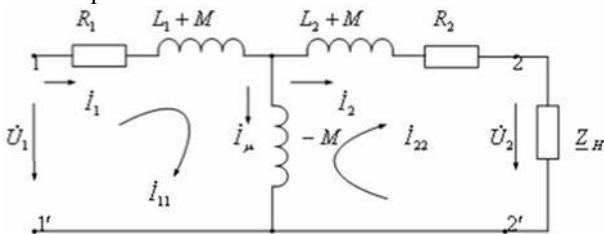


Рис. 2

Система рівнянь (2), що описує електромагнітні процеси, що відбуваються в лінійному трансформаторі, може бути представлена таким чином:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + Z_M \dot{I}_2 \\ -Z_M \dot{I}_1 = Z_{2H} \dot{I}_2 \end{cases}, \quad (4)$$

де $Z_{2H} = Z_2 + Z_H$.

З другого рівняння приведеної вище системи рівнянь (4) виходить:

$$\dot{I}_2 = -\frac{Z_M \dot{I}_1}{Z_{2H}}. \quad (5)$$

Якщо підставити значення струму \dot{I}_2 , описуване виразом (5), в перше рівняння системи (4), воно перетвориться в рівняння з одним невідомим \dot{I}_1 :

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 - \frac{Z_M^2 \dot{I}_1}{Z_{2H}},$$

отже

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1 Z_{2H}}{Z_1 Z_{2H} - Z_M^2}. \quad (6)$$

Щоб одержати формулу визначення струму у вторинній обмотці необхідно у вираз (5) підставити співвідношення (6), тоді:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1 Z_M}{Z_M^2 - Z_1 Z_{2H}}. \quad (7)$$

Систему рівнянь (3) можна записати в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{11} \\ \dot{E}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{22} \end{bmatrix}.$$

При цьому контурний струм \dot{I}_{kk} може бути знайдений, наприклад, по формулі Крамера

$$\dot{I}_{kk} = \frac{\Delta_k}{\Delta},$$

де Δ - визначник матриці опорів; Δ_k - допоміжний визначник, одержуваний з головного заміною k -го стовпця матриці опорів стовпцем вільних членів системи рівнянь (стовпцем е. р. с. \dot{E}).

Таким чином

$$\Delta = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} = Z_{11} Z_{22} - Z_{12} Z_{21},$$

оскільки

$$Z_{11} = Z_1, \quad Z_{22} = Z_{2H}, \quad Z_{12} = Z_{21} = Z_M,$$

то

$$\Delta = Z_1 Z_{2H} - Z_M^2.$$

Враховуючи, що:

$$\dot{E}_{11} = \dot{U}_1, \quad \dot{E}_{22} = 0,$$

тому допоміжний визначник Δ_1 визначають як

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \dot{E}_{11} & Z_{12} \\ \dot{E}_{22} & Z_{22} \end{vmatrix} = \dot{E}_{11} Z_{22} - \dot{E}_{22} Z_{12} = \dot{U}_1 Z_{2H},$$

а допоміжному визначнику Δ_2 відповідає вираз

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} Z_{11} & \dot{E}_{11} \\ Z_{21} & \dot{E}_{22} \end{vmatrix} = \dot{E}_{22} Z_{11} - \dot{E}_{11} Z_{21} = -\dot{U}_1 Z_M.$$

Отже, контурний струм \dot{I}_{11} першого контуру схеми заміщення трансформатора (рис. 2) описується співвідношенням:

$$\dot{I}_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\dot{U}_1 Z_{2H}}{Z_1 Z_{2H} - Z_M^2} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 - \frac{Z_M^2}{Z_{2H}}}. \quad (8)$$

При цьому контурний струм \dot{I}_{22} другого контуру тієї ж схеми заміщення лінійного трансформатора визначається як

$$i_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-\dot{U}_1 Z_M}{Z_1 Z_{2H} - Z_M^2} = \frac{\dot{U}_1}{Z_M - \frac{Z_1 Z_{2H}}{Z_M}}. \quad (9)$$

Порівняння формул (6) і (7) відповідно з формулами (8) і (9) свідчить про те, що вхідні і вихідні струми лінійного трансформатора (рис. 1) рівні вхідним і вихідним струмам схеми заміщення (рис. 2).

Висновки. Таким чином, порівняння формул (6) і (7) відповідно з формулами (8) і (9) свідчить про те, що вхідні і вихідні струми лінійного трансформатора (рис. 1) рівні вхідним і вихідним струмам схеми заміщення (рис. 2). Отже, при рівності вхідних напруг трансформатора і схеми заміщення їх вихідні напруги теж рівні, якщо рівні опори навантажень схеми заміщення і лінійного трансформатора. Отже, електромагнітні процеси схеми заміщення, що не містить індуктивних зв'язків, еквівалентні електромагнітним процесам лінійного трансформатора.

Таким чином, дана схема заміщення трансформатора може бути використана як при вивченні електромагнітних процесів лінійного трансформатора, так і при розробці, проектуванні, розрахунку всіх електротехнічних пристроїв, що мають в своєму складі даний трансформатор.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Придубков П.Я., Хоменко І.В. Математичне моделювання електромагнітних процесів ідеального трансформатора // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – № 11. – 2010. – с. 62.
2. Придубков П.Я., Хоменко І.В. Дослідження схеми заміщення лінійного трансформатора // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – № 9. – 2010. – с. 50.
3. Придубков П.Я., Хоменко І.В. Теорія чотириполюсників і схема заміщення трансформатора // Електротехніка і електромеханіка. – № 1. – 2011. – с. 58-60.
4. Зевеке Г. В. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1984. – 559 с.

Bibliography (transliterated): 1. Pridubkov P.J.A., Homenko I.V. Matematichne modeljuvannja elektromagnitnih protseciv idealnogo transformatora // Energoberezenie. Energetika. Energoaudit. - № 11. - 2010. - с. 62. 2. Pridubkov P.J.A., Homenko I.V. Doclidjennja chemi zamischennja lini'nogo transformatora // Energoberezenie. Energetika. Energoaudit. - № 9. - 2010. - с. 50. 3. Pridubkov P.J.A., Homenko I.V. Teorija chotiripoljucnikiv i chema zamischennja transformatora // Elektrotehnika i elektromehanika. - № 1. - 2011. - с. 58-60. 4. Zeveke G. V. i dr. Ocnov'i teorii tsepe'. - M.: Energoatomizdat, 1989. - 528 с. 5. Becconov L. A. Teoreticheckie ocnov'i elektrotehniki. Elektricheckie tsepi. - M.: V'ichshaja shkola, 1984. - 559 с.

Надійшла 12.12.2010

Придубков Павло Якович, к.т.н., доц.
доцент кафедри "Електротехніка та електричні машини"
Українська державна академія залізничного транспорту
61050, Харків, пл. Фейербаха, 7
тел. (057) 7301996

Хоменко Ігор Васильович, к.т.н., доц.
доцент кафедри "Передача електричної енергії"
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
61002, Харків, вул. Фрунзе 21

Pridubkov P.Y., Khomenko I.V.

Research on linear transformer currents equivalence to its equivalent circuit input and output currents.

It is shown that linear transformer equations can be considered as an equations set formed with a loop-current method if winding currents are considered as loop currents. It is shown that the given set corresponds to the same transformer equivalent circuit with removed magnetic coupling as the one developed earlier. It is proven that the equivalent circuit input and output currents are equal to the linear transformer input and output currents, correspondingly.

Key words – linear transformer, equivalent circuit, input and output currents.

М.И. Баранов, В.И. Кравченко, М.А. Носенко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА К ПРЯМОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ. ЧАСТЬ 2: СТОЙКОСТЬ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ

Дослідним шляхом отримані результати електротермічної стійкості ряду коротких зразків мідних проводів і кабелів різних марок бортових електричних кіл літального апарату у разі прямої роздільної або сумісної дії на них імпульсної А- та тривалої С- компонент струму штучної блискавки з нормованими згідно міжнародних вимог амплітудно-тимчасовими параметрами.

Опытным путем получены результаты электротермической стойкости ряда коротких образцов медных проводов и кабелей различных марок бортовых электрических цепей летательного аппарата в случае прямого раздельного или совместного воздействия на них импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с нормированными согласно международных требований амплитудно-временными параметрами.

ВВЕДЕНИЕ

В [1] авторами были представлены определенные результаты экспериментальных исследований электротермической стойкости к прямому воздействию в атмосферном воздухе импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии для ряда листовых образцов обшивки летательного аппарата (ЛА) различной толщины, выполненных из алюминиевых сплавов марок АМг2М, А0М и АД5М. Проведение подобных исследований в Украине стало возможным после создания в 2007 году на исследовательско-испытательном полигоне НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" уникального мощного генератора тока искусственной молнии (ГТМ) с суммарной запасаемой электрической энергией до 1 МДж (рис. 1) [2-5].



Рис. 1. Внешний вид мощного ГТМ на энергию в 1 МДж (на переднем плане находится рабочий стол с трехэлектродным воздушным разрядником F_1 , двухэлектродным воздушным разрядником F_2 и системой воздушной вытяжки, а на заднем плане – генераторы ГИТ-А и ГИТ-С для создания соответственно А- и С- компонент тока искусственной молнии)

Генераторы импульсных токов (ГИТ) данного ГТМ, построенные на основе высоковольтных малоиндуктивных импульсных конденсаторов (с номинальным зарядным напряжением ± 50 кВ и ± 5 кВ для ГИТ, имитирующих соответственно импульсную А- и длительную С- компоненты тока молнии), способны воспроизводить на электрической нагрузке (объекте испытаний) требуемые в соответствии с действующими в настоящее время международными нормативно-техническими документами [6-9] амплитудно-

временные параметры (АВП) пяти основных компонент тока молнии: импульсной А, промежуточной В, укороченной длительной С*, длительной С и повторной импульсной D. Расчеты результатов электротермического действия данных компонент тока молнии на различные марки проводов и кабелей ЛА и их экспериментальная проверка показывают, что наибольшей поражающей термической способностью для их проводящих жил и оболочек обладают импульсная А- и длительная С- компоненты тока искусственной молнии. АВП данных компонент тока молнии характеризуются следующими электрическими показателями [6-9]: для импульсной А- токовой компоненты – амплитудой тока $I_{mA}=200$ кА с допуском $\pm 10\%$; интегралом действия $J_{dA}=2 \cdot 10^6$ А²·с при допуске $\pm 20\%$; временем амплитуды тока $t_{mA} \leq 50$ мкс; длительностью протекания $\tau_A \leq 500$ мкс; для длительной С- токовой компоненты – амплитудой тока до $I_{mC}=0,8$ кА; количеством электричества $Q_C=200$ Кл при допуске $\pm 20\%$; длительностью протекания $0,25 \text{ с} \leq \tau_C \leq 1$ с.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРОВОДОВ (КАБЕЛЕЙ) БОРТОВЫХ ЦЕПЕЙ ЛА К ТОКУ ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Принимаем, что при электротермических испытаниях на молниестойкость в качестве испытываемых образцов (ИО) медных проводов и кабелей бортовых цепей ЛА будут выступать следующие марки кабельно-проводниковой продукции: 1) одиночный многожильный провод марки БПВЛ сечением расщепленной медной жилы 12 мм^2 ; 2) одиночный провод марки ПВ-2,5 сечением расщепленной медной жилы $2,5 \text{ мм}^2$; 3) кабель питания марки ПВС $3 \times 2,5$ с тремя медными жилами (каждая сечением $2,5 \text{ мм}^2$); 4) среднугабаритный коаксиальный радиочастотный кабель марки РК 75-4-11 сечением медной жилы $0,44 \text{ мм}^2$ и сечением медной оболочки (оплетки) $3,44 \text{ мм}^2$; 5) экранированный многожильный кабель марки UNITRONIC LYCY 20 \times 0,34 Pbf (20 медных жил сечением $0,34 \text{ мм}^2$ каждая); 6) витая неэкранированная пара марки UTP cat5 (8 медных жил сечением $0,2 \text{ мм}^2$ каждая); 7) крупногабаритный коаксиальный радиочастотный кабель марки РК 75-17-31 сечением сплошной медной жилы $10,2 \text{ мм}^2$ (без межэлектродной полиэтиленовой изоляции и с данной изоляцией). Пусть все испыты-

ваемые образцы ИО медных кабелей (проводов) ЛА имеют одинаковую длину, равную 0,55 м. Полагаем, что все ИО проводов (кабелей) ЛА закрепляются в разрыв разрядных цепей генератора ГИТ-А (генератор импульсной А- компоненты тока искусственной молнии) или генератора ГИТ-С (генератор длительной С- компоненты тока искусственной молнии) путем жесткого закрепления концов испытываемых медных токопроводов болтовыми соединениями на массивных прямоугольных алюминиевых электродах рабочего стола высоковольтного ГТМ, показанного на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид рабочего стола ГТМ, примененного при испытаниях коротких образцов медных проводов (кабелей) бортовых электрических цепей ЛА на электротермическую стойкость к импульсной А- и длительной С- компонентам тока искусственной молнии с нормированными АВП

На рис. 3 приведен общий вид ИО медного кабеля ЛА (на примере радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 длиной 0,55 м), закрепленного перед испытанием на видоизмененном рабочем столе ГТМ, содержащем в своем составе генераторы ГИТ-А и ГИТ-С.



Рис. 3. Общий вид типового закрепления на рабочем столе ГТМ ИО проводов (кабелей) ЛА (сверху над центральной зоной образца, включенного в разрыв между горизонтально расположенными массивными алюминиевыми электродами, размещен круглый стальной электрод разрядных цепей ГТМ, соединенный плоской латунной шиной с одним из массивных алюминиевых электродов рабочего стола)

Считаем, что ИО медных проводов (кабелей) ЛА в разрядные цепи используемых при указанных испытаниях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С включены согласно электрической схеме, приведенной на рис. 4.

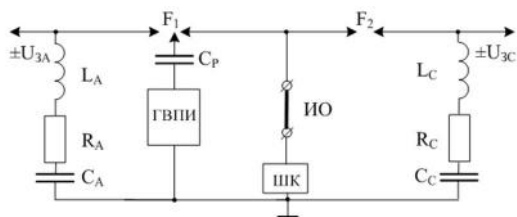


Рис. 4. Принципиальные электрические схемы разрядных цепей генераторов ГИТ-А и ГИТ-С для формирования в ИО медных проводов (кабелей) ЛА импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП

На рис. 4 приняты следующие обозначения: ИО – испытываемый образец провода (кабеля) ЛА; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения амплитудой ± 100 кВ; ШК – измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300; F_1, F_2 – соответственно трех- и двухэлектродный воздушный разрядник; C_p – разделительная емкость на 100 кВ, равная 180 пФ; U_{3A}, U_{3C} – зарядные напряжения генераторов ГИТ-А и ГИТ-С; L_A, R_A, C_A – индуктивность, активное сопротивление и емкость разрядной цепи генератора ГИТ-А; L_C, R_C, C_C – индуктивность, активное сопротивление и емкость разрядной цепи генератора ГИТ-С. Пусть отрицательное зарядное напряжение U_{3A} для ГИТ-А равно 27 кВ, а отрицательное зарядное напряжение U_{3C} для ГИТ-С – 4,2 кВ. Согласно данным схемы на рис. 4 основные электрические параметры разрядных цепей ГТМ, используемых при электротермических испытаниях образцов проводов (кабелей) ЛА, имели следующие значения [2-5]: для ГИТ-А – $C_A=333$ мкФ; $L_A=2,05$ мГн; $R_A=0,061$ Ом; для ГИТ-С – $C_C=45,36$ мФ; $L_C=11,43$ мГн; $R_C=4,74$ Ом. Считаем, что в соответствии с [2, 4] при измерении АВП импульсной А- компоненты тока молнии коэффициент преобразования $K_{шА}$ для шунта ШК-300 (рис. 5), соединенного экранированной триаксиальной кабельной линией длиной 60 м с размещенной в заглубленном экранированном измерительном бункере ГТМ регистрирующей аппаратурой (цифровыми осциллографами ЦО-1 и ЦО-2 типа ТЕКТРОНИХ TDS 1012), равен 11261 А/В, а при фиксации АВП длительной С- компоненты тока молнии коэффициент преобразования используемого нами шунта составляет $K_{шС}=5642$ А/В. Следует указать, что при расшифровке получаемых в испытательных электрических схемах генераторов ГИТ-А и ГИТ-С согласно рис. 4 амплитудных значений А- и С- компонент тока искусственной молнии, воздействующих на образцы медных проводов (кабелей) ЛА, зафиксированные на экранах осциллографов ЦО-1 и ЦО-2 величины электрических сигналов (в Вольтах) умножаются на соответствующие коэффициенты преобразования $K_{шА}$ и $K_{шС}$ шунта ШК-300 (с размерностью Ампер/Вольт).



Рис. 5. Общий вид измерительного коаксиального шунта ШК-300 с экранированной кабельной линией связи длиной 60 м и специальным делителем напряжения СД-300 [2, 4]

Отметим, что согласно рис. 4 при рассматриваемых электротермических испытаниях соответствующие импульсы тока искусственной молнии от генераторов ГИТ-А и ГИТ-С высоковольтного ГТМ подаются непосредственно на ИО медного кабеля (провода) ЛА. Между испытываемым образцом кабеля (прово-

да) ЛА прямолинейной формы и "землей" согласно рис. 4 включается измерительный шунт ШК-300, к которому с помощью кабельной линии связи и специального делителя напряжения СД-300 (см. рис. 5) параллельно подключаются сразу два цифровых запоминающих осциллографа типа TEKTRONIX TDS 1012 (по одному на каждую компоненту испытательного импульса тока молнии, так как эти токовые компоненты резко отличаются друг от друга как по амплитуде, так и по временным характеристикам). Требуется по результатам опытного электротермического действия на принятые испытываемые образцы медных проводов (кабелей) ЛА имитируемых с помощью генераторов ГИТ-А и ГИТ-С импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП определить их соответствующую реальную электротермическую стойкость.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРОВОДОВ (КАБЕЛЕЙ) ЛА К ОСНОВНЫМ КОМПОНЕНТАМ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

1. Осциллограммы испытательных компонент тока искусственной молнии. При подаче согласно рис. 4 от ГВПИ на управляющий электрод трехэлектродного воздушного разрядника F_1 каскадного типа импульса микросекундной длительности положительной полярности амплитудой 100 кВ предварительного заряженного до отрицательного напряжения $U_{3A} = -27$ кВ емкостный накопитель энергии (ЕНЭ) генератора ГИТ-А разряжается на ИО провода (кабеля) ЛА и формирует на нем требуемую в соответствии с [6-9] импульсную А- компоненту тока молнии. На рис. 6 приведена типовая осциллограмма такого тока, полученная с помощью измерительного шунта ШК-300 [2, 5] и цифрового запоминающего осциллографа типа TEKTRONIX TDS 1012 (масштаб по вертикали – 5 В/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка).

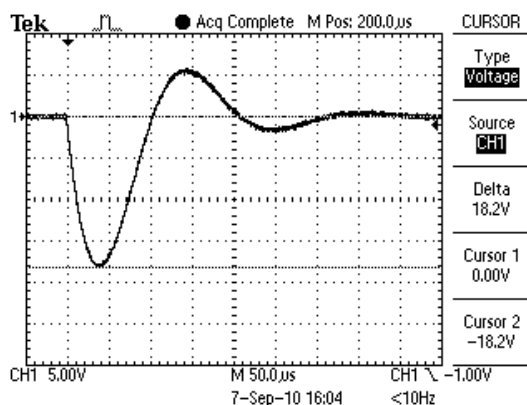


Рис. 6. Типовая осциллограмма импульсной А- компоненты тока искусственной молнии при разряде генератора ГИТ-А на ИО длиной 0,55 м провода (кабеля) ЛА при $U_{3A} = -27$ кВ

Из приведенной на рис. 6 осциллограммы импульсной А- компоненты тока молнии видно, что при коэффициенте преобразования метрологически поверенного шунта ШК-300, численно равном $K_{шА} = 11261$ А/В [2, 5], ее первая отрицательная амплитуда I_{mA} бу-

дет примерно равной $18,2 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В} = 205 \text{ кА}$. Данной амплитуде I_{mA} импульсного тока молнии соответствует время, равное $t_{mA} = 38 \text{ мкс}$ ($J_{dA} = 2,14 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$). Переход через ось абсцисс первой отрицательной полуволны данной А-компоненты тока молнии происходит при времени $t_{A1} = 100 \text{ мкс}$, а ее второй положительной полуволны – при времени около $t_{A2} = 200 \text{ мкс}$. Амплитуда второй положительной полуволны рассматриваемого тока не превышает 62 кА, а амплитуда третьей отрицательной полуволны – 16,9 кА. Импульсная А- компонента тока искусственной молнии характеризуется весьма сильным затуханием (логарифмический декремент колебаний составляет около 2,495 при коэффициенте затухания в разрядной цепи генератора ГИТ-А, примерно равном $12,47 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$).

На рис. 7 представлена типовая осциллограмма длительной С- компоненты тока искусственной молнии, полученной в электросхеме согласно рис. 4 от генератора ГИТ-С при помощи измерительного коаксиального шунта ШК-300 и цифрового осциллографа TEKTRONIX TDS 1012 (масштаб по вертикали – 50 мВ/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мс/клетка).

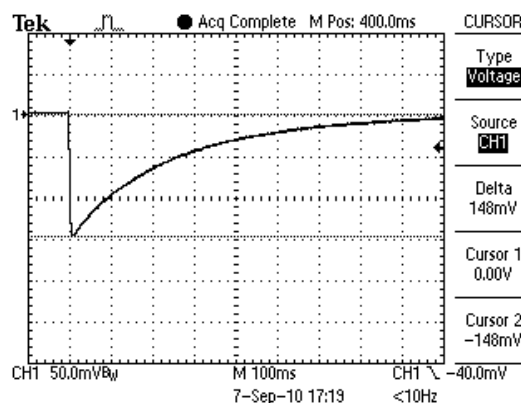


Рис. 7. Типовая осциллограмма длительной С- компоненты тока искусственной молнии при разряде генератора ГИТ-С на ИО длиной 0,55 м провода (кабеля) ЛА при $U_{3C} = -4,2$ кВ

Из данных рис. 7 следует, что амплитуда I_{mC} отрицательной аperiodической волны длительной С- компоненты имитированного тока молнии составляет значение, равное около $0,148 \text{ В} \times 5642 \text{ А/В} = 0,835 \text{ кА}$. Этой амплитуде I_{mC} тока соответствует время, равное примерно $t_{mC} = 11 \text{ мс}$. Длительность протекания по испытываемому образцу провода (кабеля) ЛА сформированной в разрядной цепи ГИТ-С длительной С- компоненты тока искусственной молнии равна около $\tau_C = 1000 \text{ мс}$, а переносимое ею через исследуемый ИО количество электричества (электрический заряд) составляет примерно величину, равную $Q_C = 203 \text{ Кл}$.

2. Особенности поведения образцов медных проводов (кабелей) ЛА при прямом действии на них тока искусственной молнии. На рис. 8 приведен внешний вид испытываемого в ГТМ образца **провода ПВ-2,5** с расщепленной медной жилой сечением $2,5 \text{ мм}^2$ до протекания по нему импульсной А- компоненты тока искусственной молнии. Внизу под данным проводом, закрепленным своими концами с помощью болтового соединения на массивных прямоугольных алюминиевых электродах рабочего стола ГТМ, на горизонталь-

но размещенной гетинаксовой пластине толщиной 10 мм виден округлый след белого цвета от последствий сквозного проплавления имитированным в ГТМ током молнии листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА с размером в плане $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$ (см. рис. 2), ранее проходивших в разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С испытания на молниестойкость [1].



Рис. 8. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца одиночного провода ПВ-2,5 с расщепленной медной жилой сечением $2,5 \text{ мм}^2$ до воздействия на него импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с зарегистрированной амплитудой $I_{mA} = -166,7 \text{ кА}$

Требуется отметить, что в соответствии с расчетной методикой, приведенной в [10, 11], для импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с принятыми нормированными ее АВП минимально допустимое по условиям нормальной работы поперечное сечение S_{0mA} электрически незагруженной медной жилы провода ПВ-2,5 (без предварительного до воздействия тока молнии протекания по ней номинального рабочего тока) составляет величину, равную $9,4 \text{ мм}^2$. Для указанного режима загрузки жилы провода ПВ-2,5 и импульсной А-компоненты тока искусственной молнии критическое поперечное сечение S_{0kA} этого провода, при котором наступает явление сублимации его медной жилы из-за ее электрического взрыва (ЭВ), согласно [10, 11] составляет $3,4 \text{ мм}^2$. На рис. 9 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ после воздействия на испытываемый медный провод ПВ-2,5 от ГИТ-А импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП.



Рис. 9. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца одиночного провода ПВ-2,5 с расщепленной медной жилой сечением $2,5 \text{ мм}^2$ после воздействия на него импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с зарегистрированной в процессе ее электровзрыва амплитудой $I_{mA} = -166,7 \text{ кА}$

Из рис. 9 видно, что твердая токонесущая часть расщепленной жилы провода ПВ-2,5 поперечным сечением $2,5 \text{ мм}^2$ на всей своей длине $0,55 \text{ м}$ подверглась полной сублимации (испарению и ее переходу в парообразное состояние минуя жидкое [12]), вызванной наступлением в ее меди явления ЭВ. Этого следовало и ожидать, так как поперечное сечение медной жилы провода ПВ-2,5 равно $2,5 \text{ мм}^2$ и меньше указанного критического значения $S_{0kA} = 3,4 \text{ мм}^2$. Поэтому эта марка медного провода и не могла выдержать электротермического воздействия на нее указанной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП. Определенный интерес представляет приведенная на рис. 10 осциллограмма разрядного тока ГИТ-А при ЭВ медного провода марки ПВ-2,5 с амплитудой I_{mA} , равной $14,8 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В} = 166,7 \text{ кА}$.

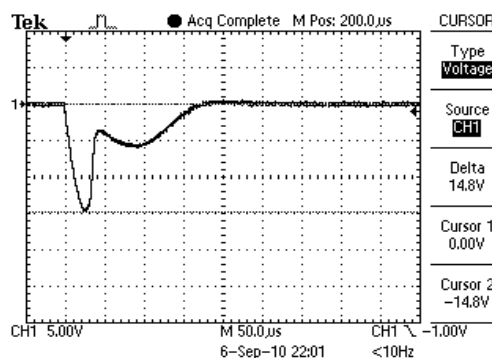


Рис. 10. Осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии при ЭВ в цепи ГИТ-А медной жилы сечением $2,5 \text{ мм}^2$ одиночного провода ПВ-2,5 ($U_{3A} = -27 \text{ кВ}$)

Из полученных для медного провода ПВ-2,5 с поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией данных явствует, что после ЭВ его жилы от действия импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП ($I_{mA} = 166,7 \text{ кА}$) изоляционные и металлические элементы рабочего стола высоковольтного ГТМ подверглись активной металлизации парами меди буро-красного цвета (см. рис. 8 и 9).

На рис. 11 показан внешний вид закрепленного на алюминиевых электродах рабочего стола ГТМ радиочастотного кабеля РК 75-17-31 с оголенной (без изоляции) сплошной медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ до воздействия на него импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП.



Рис. 11. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-17-31 с медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ до воздействия на него импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$

В результате воздействия на образец оголенной медной жилы крупногабаритного коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-17-31 импульсной A -компоненты тока имитированной молнии твердая токонесущая часть медной жилы кабеля РК 75-17-31 поперечным сечением $10,2 \text{ мм}^2$ осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 12). Из-за действия на сплошную медную жилу данного кабеля больших электродинамических усилий (ЭДУ) отталкивания от соседних токоведущих частей силовоточной цепи разряда генератора ГИТ-А (от массивной плоской латунной шины с A - компонентой тока молнии, соединяющей центральный стальной электрод рабочего стола ГТМ с его массивной алюминиевой шиной для закрепления края жилы кабеля) она подверглась определенной механической деформации.



Рис. 12. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-17-31 с медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ после воздействия на него импульсной A - компоненты тока искусственной молнии амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$

Полученные экспериментальные электротермические данные для кабеля РК 75-17-31 подтверждают результаты расчетного выбора согласно [10, 11] величин минимально допустимого $S_{0mA} = 9,4 \text{ мм}^2$ и критического $S_{0kA} = 3,4 \text{ мм}^2$ поперечных сечений для медных токопроводов, испытывающих воздействие импульсной A - компоненты тока искусственной молнии с нормированными в соответствии с [6-9] АВП.

На рис. 13 представлен общий вид рабочего стола ГТМ с ИО длиной $0,55 \text{ м}$ сплошной медной жилы сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в полувоздушной полиэтиленовой (ПЭТ) изоляции наружным диаметром 17 мм радиочастотного кабеля РК 75-17-31 до протекания по нему от ГТМ импульсного тока искусственной молнии.



Рис. 13. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-17-31 с медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в ПЭТ изоляции до совместного воздействия на него импульсной A - компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$ и длительной C - компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,914 \text{ кА}$

Следует указать, что согласно [10, 11] расчетные величины минимально допустимого S_{0mC} и критического S_{0kC} поперечных сечений для медных токопроводов, испытывающих воздействие длительной C -компоненты тока искусственной молнии с нормированными по [6-9] АВП, составляют соответственно $1,8$ и $0,67 \text{ мм}^2$. В результате совместного воздействия на испытываемый образец сплошной медной жилы сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в полувоздушной ПЭТ изоляции кабеля РК 75-17-31 импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии ($I_{mA} = -205 \text{ кА}$; $I_{mC} = -0,914 \text{ кА}$; $Q_C = 223 \text{ Кл}$) сплошная токонесущая часть медной жилы кабеля РК 75-17-31 сечением $10,2 \text{ мм}^2$ осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 14). В этом случае, аналогично, как и при электротермических испытаниях той же оголенной медной жилы данного кабеля (см. рис. 12), из-за действия на испытываемую жилу кабеля больших ЭДУ отталкивания от соседних токоведущих частей силовоточной разрядной цепи ГИТ-А она подверглась определенной механической деформации. Данная деформация твердой сплошной круглой медной жилы с полувоздушной ПЭТ изоляцией исследуемого образца радиочастотного кабеля длиной $0,55 \text{ м}$ происходит на нас (в сторону наблюдателя-пользователя фотографией на рис. 14) и она оказывается соизмеримой с той механической деформацией оголенной медной жилы этого же кабеля, которая показана выше на рис. 12.



Рис. 14. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-17-31 с медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в ПЭТ изоляции после совместного воздействия на него импульсной A - компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$ и длительной C - компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,914 \text{ кА}$

Поэтому можно заключить, что массивная полувоздушная ПЭТ изоляция сплошной круглой медной жилы коаксиального радиочастотного кабеля марки РК 75-17-31 мало влияет на ее электротермическое и электродинамическое поведение по отношению к используемым при проводимых испытаниях основным компонентам тока искусственной молнии с нормированными АВП. Так как поперечное сечение исследуемой сплошной медной жилы $10,2 \text{ мм}^2$ кабеля РК 75-17-31 превышает расчетные значения $S_{0mA} = 9,4 \text{ мм}^2$ и $S_{0mC} = 1,8 \text{ мм}^2$, а также расчетные значения $S_{0kA} = 3,4 \text{ мм}^2$ и $S_{0kC} = 0,67 \text{ мм}^2$, то испытываемая медная жила будет электротермически стойкой к совместному воздействию на нее импульсной A - и длительной C - компонент

тока искусственной молнии с нормированными АВП. Данный вывод, базирующийся на расчетных электро-термических данных согласно [10, 11], полностью подтверждают приведенные выше экспериментальные результаты для радиочастотного кабеля РК 75-17-31.

На рис. 15 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем образца среднегабаритного коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-4-11 со сплошной медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и параллельно подключенной к ней на ее концах медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$ до действия на него от ГИТ-А импульсной А- компоненты тока молнии.



Рис. 15. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-4-11 с медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ до воздействия на него импульсной А- компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA}=-205 \text{ кА}$

В результате воздействия импульсной А- компоненты тока имитированной молнии на данный образец кабеля РК 75-4-11 с медной сплошной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и параллельно подключенной к ней его медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$, суммарное сечение которых оказывается соизмеримым с расчетной величиной критического сечения $S_{0kA}=3,4 \text{ мм}^2$ для медных токопроводов данному току молнии, твердые токонесущие части испытываемого образца кабеля с межэлектродной сплошной ПЭТ изоляцией наружным диаметром 4 мм из-за наступления в их меди явления ЭВ подверглись полной сублимации, то есть испарению и их переходу в парообразное состояние, минуя жидкое [12]. Из-за этого изоляционные и металлические элементы рабочего стола высоковольтного ГТМ подверглись, как и в случае испытания импульсной А- компонентой тока искусственной молнии одиночного провода ПВ-2,5 с расщепленной медной жилой сечением $2,5 \text{ мм}^2$ (см. рис. 9), активной металлизации парами меди буро-красного цвета (рис. 16).

На рис. 17 для этого экстремального случая электро-термических испытаний при помощи ГТМ короткого образца среднегабаритного коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-4-11 длиной 0,55 м, сопровождающегося явлением ЭВ его токонесущих медных частей, приведена осциллограмма протекающего через него соответствующего разрядного тока высоковольтного генератора ГИТ-А ($U_{3A}=-27 \text{ кВ}$) амплитудой $I_{mA}=-184,7 \text{ кА}$, получаемой при расшифровке данной осциллограммы из произведения, равного $16,4 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В}$. Видно, что данная токовая осциллограмма имеет определенные отличия по форме и

амплитуде от приведенной на рис. 10 осциллограммы также импульсной А- компоненты тока искусственной молнии, полученной от того же высоковольтного генератора ГИТ-А и при том же зарядном напряжении его ЕНЭ ($U_{3A}=-27 \text{ кВ}$) и характерной для явления ЭВ медной жилы сечением $2,5 \text{ мм}^2$ одиночного провода ПВ-2,5 аналогичной длины 0,55 м. Из данных рис. 17 видно, что потеря при этом токонесущими медными частями кабеля РК 75-4-11 металлической проводимости из-за наступления явления их ЭВ приводит к разрыву цепи разряда генератора ГИТ-А и соответственно к прерыванию в течение порядка 150 мкс формируемой в ГТМ импульсной А- компоненты тока молнии. Без такого вынужденного прерывания цепи разряда ЕНЭ генератора ГИТ-А длительность протекания данного тока молнии составляет около $\tau_A=500 \text{ мкс}$.



Рис. 16. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-4-11 с медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$ после воздействия на него импульсной А- компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA}=-184,7 \text{ кА}$

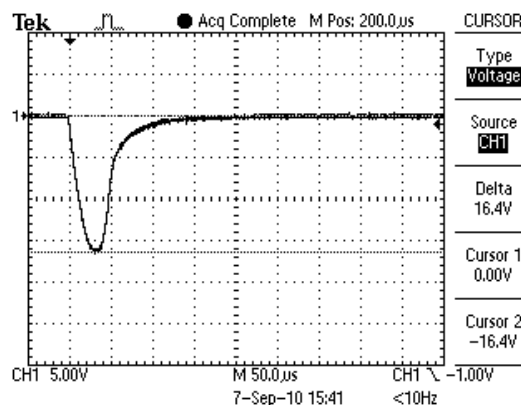


Рис. 17. Осциллограмма импульсной А- компоненты тока искусственной молнии при ЭВ в цепи разряда ГИТ-А медной жилы сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплетки сечением $3,44 \text{ мм}^2$ радиочастотного кабеля РК 75-4-11 ($U_{3A}=-27 \text{ кВ}$)

На рис. 18 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем образца среднегабаритного коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-4-11 со сплошной медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и параллельно подключенной к ней на ее обоих краях медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$ до действия на него от генератора ГИТ-С длительной С- компоненты тока имитированной молнии с принятыми АВП.



Рис. 18. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-4-11 с медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ до воздействия на него длительной C -компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,891 \text{ кА}$

В результате воздействия от генератора ГИТ-С ($U_{3C} = -4,2 \text{ кВ}$) на данный образец радиочастотного кабеля РК 75-4-11 длительной C -компоненты тока искусственной молнии ($I_{mC} = -0,891 \text{ кА}$; $\tau_C = 1000 \text{ мс}$; $Q_C = 213 \text{ Кл}$) твердые токонесущие части сплошной медной жилы сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплетки сечением $3,44 \text{ мм}^2$ испытываемого кабеля остались целыми и электротермически не поврежденными (рис. 19). Этот опытный результат подтверждает расчетные оценки по [10, 11] электротермической стойкости медных проводов (кабелей) к рассматриваемому импульсному току молнии. Согласно этим расчетным оценкам так как суммарное сечение медной жилы и медной оплетки испытываемого кабеля РК 75-4-11 величиной $3,847 \text{ мм}^2$ является больше минимально допустимого $S_{0mC} = 1,8 \text{ мм}^2$ и тем более критического $S_{0kC} = 0,67 \text{ мм}^2$ для медного токопровода сечений, то данный кабель при параллельном подключении его медной жилы и медной оплетки должен быть электротермически стойким к воздействию длительной C -компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП. Это положение и было подтверждено экспериментальным путем на мощном ГТМ.



Рис. 19. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца радиочастотного кабеля РК 75-4-11 с медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$ после воздействия на него длительной C -компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,891 \text{ кА}$

На рис. 20 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем испытываемого образца одиночного многожильного провода БПВЛ поперечным сечением расщепленной медной жилы 12 мм^2 до

комплексного действия на него основных компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП.



Рис. 20. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца провода БПВЛ с медной жилой сечением 12 мм^2 до совместного воздействия на него импульсной A -компоненты тока молнии амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$ и длительной C -компоненты тока молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,880 \text{ кА}$

В результате совместного воздействия на указанный образец медного провода БПВЛ одновременно (последовательно друг за другом) импульсной A - ($I_{mA} = -205 \text{ кА}$; $t_{mA} = 38 \text{ мкс}$; $\tau_A = 500 \text{ мкс}$; $U_{3A} = -27 \text{ кВ}$) и длительной C - ($I_{mC} = -0,880 \text{ кА}$; $\tau_C = 1000 \text{ мс}$; $Q_C = 210 \text{ Кл}$; $U_{3C} = -4,2 \text{ кВ}$) компонент тока искусственной молнии токонесущая часть расщепленной медной жилы сечением 12 мм^2 одиночного многожильного провода БПВЛ осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 21). Как и в случае испытания кабеля РК 75-17-31 с медной жилой поперечным сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в полувоздушной ПЭТ изоляции (см. рис. 14) медный провод БПВЛ с ПВХ изоляцией из-за действия на него больших ЭДУ подвергся определенной механической деформации. Эта деформация оказывается соизмеримой с той деформацией сплошной медной жилы сечением $10,2 \text{ мм}^2$ радиочастотного кабеля РК 75-17-31, которая показана выше на рис. 12 и 14.



Рис. 21. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца провода БПВЛ с медной жилой сечением 12 мм^2 после совместного воздействия на него импульсной A -компоненты тока молнии амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$ и длительной C -компоненты тока молнии амплитудой $I_{mC} = -0,880 \text{ кА}$

В связи с тем, что величина поперечного сечения расщепленной медной жилы провода БПВЛ составляет 12 мм^2 и соответственно превышает согласно [10, 11] расчетные значения минимально допустимых сечений $S_{0mA} = 9,4 \text{ мм}^2$ и $S_{0mC} = 1,8 \text{ мм}^2$ для медных токо-

проводов к основным компонентам тока искусственной молнии с нормированными по [6-9] АВП, то данный провод и оказывается электротермически стойким к рассматриваемому совместному воздействию на него импульсной *A*- и длительной *C*- компонент тока искусственной молнии с указанными АВП.

На рис. 22 представлен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем испытываемого образца экранированного многожильного кабеля **UNITRONIC LIYCY 20x0,34 Pbf** с шестью его параллельно включенными в разрядную цепь ГТМ медными жилами (поперечным сечением 0,34 мм² каждая) суммарным сечением 2,04 мм² до воздействия на него от генератора ГИТ-С длительной *C*- компоненты тока имитированной молнии с нормированными АВП ($I_{mC} = -0,857$ кА; $\tau_C = 1000$ мс; $Q_C = 207$ Кл; $U_{3C} = -4,2$ кВ). В результате воздействия на данный образец кабеля рассматриваемой компоненты имитированного в ГТМ тока молнии твердая токонесущая часть шести параллельно подключенных к генератору ГИТ-С медных жил экранированного многожильного кабеля марки **UNITRONIC LIYCY 20x0,34 Pbf** с суммарным сечением 2,04 мм² осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 23). Из-за действия на испытываемые медные жилы данного кабеля повышенной температуры от джоулева нагрева они подверглись достаточно сильному электротермическому перегреву и получили незначительную дополнительную механическую деформацию прогиба (см. рис. 22 и 23). Одним из подтверждений тому является слипание между собой перегретой резиновой изоляции испытанных медных жил этого многожильного кабеля.



Рис. 22. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца экранированного многожильного кабеля **UNITRONIC LIYCY 20x0,34 Pbf** с шестью его параллельно подключенными медными жилами общим сечением 2,04 мм² до воздействия на него длительной *C*- компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,857$ кА

В связи с тем, что величина суммарного поперечного сечения шести параллельно включенных между собой медных жил испытываемого многожильного кабеля составляет 2,04 мм² и превышает значение указанного выше минимально допустимого для медного токопровода к этому току сечения $S_{0mC} = 1,8$ мм², то данный кабель и должен был быть электротермически стойким к рассматриваемому воздействию на него *C*- компоненты тока искусственной молнии.

На рис. 24 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем испытываемого образца кабеля **ПВС 3x2,5** с тремя параллельно включенными

между собой медными жилами (поперечным сечением 2,5 мм² каждая) суммарным сечением 7,5 мм² нормированной импульсной *A*- компоненты тока искусственной молнии ($I_{mA} = -200$ кА; $t_{mA} = 38$ мкс; $\tau_A = 500$ мкс; $J_{dA} = 2,03 \cdot 10^6$ А²·с; $U_{3A} = -27$ кВ). В результате воздействия на данный образец кабеля питания **ПВС 3x2,5** длиной 0,55 м импульсной *A*- компоненты тока искусственной молнии с указанными АВП токонесущая часть медных жил кабеля **ПВС 3x2,5** с суммарным поперечным сечением 7,5 мм² в местах крепления их краев на массивных прямоугольных алюминиевых электродах рабочего стола ГТМ из-за сильного джоулева нагрева перегорела, а по длине кабеля осталась целой, но термически перегретой (рис. 25).



Рис. 23. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца экранированного многожильного кабеля **UNITRONIC LIYCY 20x0,34 Pbf** с шестью его параллельно подключенными медными жилами общим сечением 2,04 мм² после воздействия на него длительной *C*- компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,857$ кА



Рис. 24. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля **ПВС 3x2,5** с тремя медными жилами общим сечением 7,5 мм² до воздействия на него импульсной *A*- компоненты тока молнии амплитудой $I_{mA} = -200$ кА

В результате такого электротермического воздействия на испытываемый кабель **ПВС 3x2,5** импульсной *A*- компоненты тока имитированной молнии с принятыми АВП он оторвался от мест своего крепления и упал на гетинаксовое покрытие толщиной 10 мм рабочего стола высоковольтного ГТМ (рис. 25).



Рис. 25. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля ПВС 3x2,5 с тремя медными жилами общим сечением 7,5 мм² после воздействия на него импульсной *A*-компоненты тока молнии амплитудой $I_{mA} = -200$ кА

Обследование ПВХ изоляции трех медных жил кабеля ПВС 3x2,5 после проведенного его электротермического испытания показало, что она в области краевых зон кабеля (шириной до 20 мм с находящимися внутри ПВХ оболочки целыми медными жилами) спеклась друг с другом без локальных трещин и иных видимых повреждений. Так как суммарное сечение трехжильного медного кабеля ПВС 3x2,5 составляет 7,5 мм² и оказывается близким к расчетному по [10, 11] минимально допустимому для него сечению $S_{0mA} = 9,4$ мм² и превышающим соответствующее расчетное критическое сечение $S_{0kA} = 3,4$ мм², то поэтому медные жилы данного кабеля электрически не взорвались, но на краях термически перегрелись.

На рис. 26 показан общий вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем испытываемого образца неэкранированной витой пары UTP cat5 с восемью параллельно включенными между собой медными жилами (каждая сечением 0,2 мм²) при их суммарном поперечном сечении 1,6 мм² до прямого воздействия на нее от генератора ГИТ-С нормированной длительной *C*-компоненты тока искусственной молнии ($I_{mC} = -0,835$ кА; $\tau_C = 1000$ мс; $Q_C = 203$ Кл; $U_{3C} = -4,2$ кВ).



Рис. 26. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца неэкранированной витой пары UTP cat5 с восемью медными жилами общим сечением 1,6 мм² до воздействия на нее длительной *C*-компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,835$ кА

В результате воздействия на данный образец неэкранированной витой пары UTP cat5 указанной компоненты тока имитированной молнии твердая токонесящая часть восьми параллельно подключенных к

генератору ГИТ-С ее расщепленных медных жил с суммарным поперечным сечением 1,6 мм² осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 27). После протекания по испытываемой витой паре указанной компоненты тока молнии она подверглась определенной термомеханической деформации (см. рис. 27) из-за действия на нее большой тепловой нагрузки от протекающего по ней тока и ЭДУ, природа которых аналогично описанной выше при испытаниях радиочастотного кабеля РК 75-17-31 (см. рис. 14).

В связи с тем, что суммарное поперечное сечение 1,6 мм² восьми параллельно соединенных между собой медных жил исследуемой на электротермическую стойкость витой пары марки UTP cat5 практически соизмеримо с расчетным согласно [10, 11] минимально допустимым для нее сечением $S_{0mC} = 1,8$ мм², то испытываемая витая пара приложенное к ней электротермическое воздействие, вызванное протеканием по ее токонесящим частям нормированной длительной *C*-компоненты тока искусственной молнии, выдержала практически без всяких нарушений.



Рис. 27. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца неэкранированной витой пары UTP cat5 с восемью медными жилами общим сечением 1,6 мм² после воздействия на нее длительной *C*-компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,835$ кА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные на уникальном отечественном мощном ГТМ натурные экспериментальные исследования позволили определить электротермическую стойкость семи марок с различной изоляцией и различного сечения медных проводов и кабелей бортовых электрических цепей ЛА к импульсной *A*- и длительной *C*-компонентам тока имитированной молнии с нормированными согласно действующим в авиационной и ракетно-космической отраслях ведущих стран мира международным требованиям [6-9] АВП.

2. Выполненные эксперименты подтвердили работоспособность расчетной методики согласно [10, 11] по оценке электротермической стойкости изолированных (оголенных) проводов и кабелей с медными жилами (оболочками) к прямому воздействию на них основных компонент больших и слабых по амплитуде импульсных токов молнии, отличающихся большим количеством протекающего от них по токонесящим частям проводов (кабелей) за время их действия электрического заряда.

3. Полученные результаты могут быть практиче-

ски использованы инженерно-техническим персоналом при испытаниях различной номенклатуры проводов (кабелей) ЛА на стойкость к прямому воздействию на них больших (слабых) импульсных токов молнии с заданными АВП и выборе для бортовых электрических цепей ЛА электротермически стойкой к наиболее опасным для ЛА прямым ударам линейной молнии кабельно-проводниковой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И., Кравченко В.И., Носенко М.А. Экспериментальные исследования электротермической стойкости металлических элементов летательного аппарата к прямому воздействию тока искусственной молнии. Часть 1: Стойкость алюминиевой обшивки // *Электротехника и электромеханика*. – 2011. – № 1. – С. 65-71.
2. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – № 3. – С. 81-85.
3. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Высоковольтные силовоточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – № 6. – С. 58-62.
4. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии и ее применение в области молниезащиты технических объектов // *Электротехника и электромеханика*. – 2008. – № 3. – С. 69-75.
5. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощный импульсный генератор тока молнии: разработка и примеры применения / *Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы Международной научной конференции (17-21 августа 2009 г.)*. – Николаев: КП "Миколаївська обласна друкарня", 2009. – С. 113-115.
6. SAE ARP 5412/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока" (США), 1985. – С. 30-39.
7. SAE ARP 5416/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов" (США), 1997. – 145 с.
8. КТР-ВВФ/DO-160D/ED-14D. Квалификационные требования "Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний". Раздел 23.0. "Прямое воздействие молнии". – М.: Изд-во госстандартов Российской Федерации. – 2004. – С. 258-273.
9. MIL-STD-464A. Военный стандарт США "Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем". – 2002. – С. 1-162.
10. Баранов М.И. Электротермическая стойкость изолированных проводов и кабелей к воздействию больших импульсных токов молнии // *Электротехника и электромеханика*. – 2003. – № 2. – С. 67-74.
11. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2010. – 407 с.
12. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.

Bibliography (transliterated): 1. Baranov M.I., Kravchenko V.I., Nosenko M.A. Eksperimentaln'ie issledovaniya elektrottermicheskoj sto'kosti metallicheckih elementov letatel'nogo apparata k prjamomu vozde'ctviyu toka ickucctvenno' molnii. CHast 1: Sto'kost aljuminievo' obshivki // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2011. – № 1. – С. 65-71. 2. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka ickucctvenno' molnii dlja natur'nih icp'itani' tehnicheckih obektov // *Pribor'i i tehnika eksperimenta*. – 2008. – № 3. – С. 81-85. 3. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. V'icokovolt'n'ie cilnotochn'ie vozdušn'ie razrjadniki generatora toka ickucctvenno' molnii // *Pribor'i i tehnika eksperimenta*. – 2008. – № 6. – С. 58-62. 4. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Moschnaja v'icokovolt'naja elektrofizicheckaja uctanovka dlja imitatsii pol'nogo toka molnii i ee primenenie v oblacti molniezaschiti' tehnicheckih obektov // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2008. – № 3. – С. 69-75. 5. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Moschn'i' impulcn'i' generator toka molnii: razrabotka i primer'i primeneniya / *Fizika impulcn'ih razrjadov v kondencirovann'ih credah: Material'i Mejdunarodno' naučno' konferentsii (17-21 avgusta 2009 g.)*. – Nikolaev: KP "Mikolaivcka oblacna drukarnja", 2009. – С. 113-115. 6. SAE ARP 5412/ED-84. Normativn'i' dokument "Rekomenduemaja praktika aviatsionno-kosmicheckih rabot. Idealizirovann'ie soctavl'ajuschie vneshnego toka" (CSHA), 1985. – С. 30-39. 7. SAE ARP 5416/ED-84. Normativn'i' dokument "Rekomenduemaja praktika aviatsionno-kosmicheckih rabot. Uclovija vozde'ctviya molnii na letateln'ie apparat'i i sootvetstvujuschie form'i icp'itateln'ih signalov" (CSHA), 1997. – 145 c. 8. KTR-VVF/DO-160D/ED-14D. Kvalifikatsionn'ie trebovanija "Uclovija ekpluatatsii i okruajusche' cred'i dlja bortovogo aviatsionnogo oborudovanija. Trebovanija, norm'i i metod'i icp'itani'". Razdel 23.0. "Prjamoe vozde'ctvie molnii". – M.: Izd-vo gosctandartov Rocci'cko' Federatsii. – 2004. – С. 258-273. 9. MIL-STD-464A. Voenn'i' ctandart CSHA "Elektromagnitn'ie i ekologiceckie effekt'i vozde'ctviya molnii. Trebovanija interfe'ca i kriterii proverki cictem". – 2002. – С. 1-162. 10. Baranov M.I. Elektrottermicheckaja sto'kost izolirovann'ih provodov i kabele' k vozde'ctviyu bolshih impulcn'ih tokov molnii // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2003. – № 2. – С. 67-74. 11. Baranov M.I. Izbrann'ie voproc'i elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 2: Teorija elektrofizicheckih effektov i zadach. – Harkov: Izd-vo NTU "HPI", 2010. – 407 c. 12. Knopfel G. Cverhciln'ie impulcn'ie magnitn'ie polja. – M.: Mir, 1972. – 391 c.

Поступила 27.11.2010

*Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,
Кравченко Владимир Иванович, д.т.н., проф.,
Носенко Марина Александровна, н.с.
НИПКИ "Молния"
Национального технического университета
"Харьковский политехнический институт"
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47
тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua*

Baranov M.I., Kravchenko V.I., Nosenko M.A.
**Experimental research into electrothermal stability
of aircraft metallic elements against direct action
of artificial lightning current. Part 2: stability of copper
wires and cables.**

Results of electrothermal stability are experimentally obtained for a number of short copper wires and cables specimens of various brands of air-borne electrical circuits under direct separate or joint action of pulse A or continuous C components of artificial lightning current with peak-time parameters rated according to international requirements.

Key words – artificial lightning current, air-borne copper wires and cables, electrothermal stability.

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ВИТОК КОНЕЧНОЙ ШИРИНЫ С РАЗРЕЗОМ НАД ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩИМ МАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ

У статті вирішена тривимірна електродинамічна задача просторово-часового розподілу вихрових струмів, збуджених полем плоского незамкнутого кругового витка кінцевої ширини в масивному провіднику з високим значенням питомої електропровідності. Проведено порівняння отриманих результатів з аналогами для нескінченно тонкого витка.

В статье решена трёхмерная электродинамическая задача пространственно-временного распределения вихревых токов, возбуждаемых полем плоского незамкнутого кругового витка конечной ширины в массивном проводнике с высоким значением удельной электропроводности. Проведено сравнение полученных результатов с аналогами для бесконечно тонкого витка.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. В современной практике магнитно-импульсной обработки металлов в качестве инструментов часто находят своё применение одновитковые индукторные системы цилиндрической геометрии [1-3]. Индукторы в этих инструментах при электродинамических расчётах представляются замкнутыми круговыми контурами. Это позволяет ввести условие аксиальной симметрии и существенно упростить решение задачи [4-6].

В реальных условиях виток индуктора не может быть замкнутым круговым контуром, поскольку он является элементом, последовательно включаемым в цепь источника мощности. Это означает, что виток соленоида – "незамкнут", он имеет "разрыв" и функция, описывающая азимутальное распределение возбуждающего тока, терпит разрыв второго рода.

Допущение аксиальной симметрии нарушается тем больше, чем больше требуемое по конструктивным соображениям расстояние между электрическими выводами к источнику мощности. Нарушение аксиальной симметрии приводит к неадекватности широко применяемой симметричной модели расчёта реальных систем "виток – проводящий объект".

Анализ основных достижений и публикаций.

Проблематике инструментов магнитно-импульсного воздействия на обрабатываемые металлы посвящено довольно много работ, где представлены определённые достижения в этой области [1-7]. Анализ основных публикаций показывает, что при расчёте электродинамических процессов, их авторы используют различные упрощающие допущения. Это, в частности, аксиальная симметрия соленоида, бесконечно малая ширина витка индуктора и т.д. [1, 3, 6, 7]. Допущения подобного рода нивелируют тот факт, что, например, нарушение аксиальной симметрии формы источника поля – индуктора ведёт к искажению силового воздействия на обрабатываемый объект. Последний фактор объясняет многие неудачные применения электромагнитных полей для решения насущных технологических задач.

Все это приводит к необходимости качественной оценки протекающих электромагнитных процессов, но уже без аксиальной симметрии источника электромагнитного поля, а также оценки влияния ширины витка соленоида на эти же электромагнитные процессы.

Цель настоящей работы – решение трёхмерной электродинамической задачи пространственно-временного распределения вихревых токов, возбуждаемых полем плоского "незамкнутого" кругового витка конечной ширины в массивном проводнике с высоким значением удельной электропроводности. Сравнение характеристик электродинамических процессов для витка конечной ширины и бесконечно тонкого витка.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ РЕШЕНИЕ

Расчётная модель представлена на рис. 1, где $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$ – направляющие орты координат в выбранной цилиндрической системе координат.

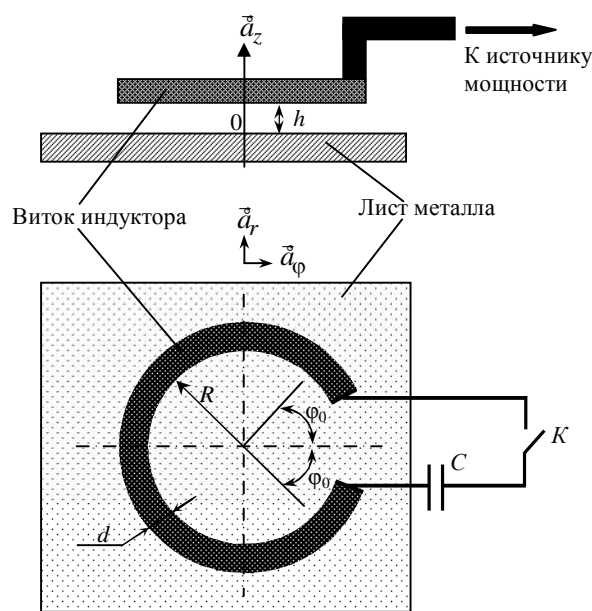


Рис. 1 Плоский "незамкнутый" виток над массивным металлическим листом

Решение поставленной задачи условно разделим на две части.

Сначала рассмотрим возбуждение индуцированных токов идеализированным бесконечно тонким витком. Данное приближение позволит избежать неоднозначности в интерпретации расчётных результатов, обусловленной конечными радиальными размерами индуктора в зоне "разреза".

Последующее рассмотрение будет посвящено

возбуждению вихревых токов витками с заданными поперечными размерами. Полученные здесь выводы не только дополняют результаты предыдущей идеализации, но и позволяют приблизиться к решению задач реально-проектирования рабочих инструментов магнитно-импульсного метода в современных технологиях.

Для решения поставленной задачи примем следующие допущения.

- Бесконечно протяжённый в поперечных направлениях металлический лист – объект обработки выполнен из немагнитного идеального проводника.

- Виток индуктора расположен над поверхностью пластины на расстоянии – h , его радиус – R , шириной d , и, математически, расположение возбуждающего тока индуктора можно описать произведением дельта-функций Дирака $\sim \delta(z-h) \cdot \delta(r-R)$.

- В местах подключения витка к источнику имеет место "разрыв" по азимуту, описываемый функцией

$$f(\phi) = \eta(\phi - \phi_0) - \eta(\phi - (2\pi - \phi_0)),$$

где $\eta(\phi)$ – ступенчатая функция Хевисайда, $2\phi_0$ – величина "разрыва" в витке, выраженная в терминах азимутального угла.

- По витку протекает азимутальный ток с плотностью – $j_{\phi i}(t, r, \phi, z)$,

$$j_{\phi i}(t, r, \phi, z) = j_m j(t) \cdot \delta(r-R) \cdot \delta(z-h) \cdot f(\phi),$$

где j_m – амплитуда, $j(t)$ – временная зависимость, t – время.

В соответствии с принятыми допущениями в системе возбуждается магнитное поле с вектором напряжённости $\vec{H} = \{H_r \neq 0, H_\phi \neq 0, H_z \neq 0\}$.

Уравнения Максвелла запишутся в вид:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H}(t, r, \phi, z) = j_{\phi i}(t, r, \phi, z); \\ \text{div } \vec{H}(t, r, \phi, z) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Из системы (1) получаем уравнения в частных производных для ненулевых компонент вектора напряжённости магнитного поля [7-9]:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H_z(t, r, \phi, z)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z(t, r, \phi, z)}{\partial \phi^2} + \\ + \frac{\partial^2 H_z(t, r, \phi, z)}{\partial z^2} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot j_{\phi i}(t, r, \phi, z)); \\ \frac{\partial H_z(t, r, \phi, z)}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial z} (r \cdot H_\phi(t, r, \phi, z)) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot H_\phi(t, r, \phi, z)) - \frac{\partial H_r(t, r, \phi, z)}{\partial \phi} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая азимутальную зависимость тока в витке, его можно представить разложением по косинусам кратных дуг [8]:

$$j_{\phi i}(t, r, \phi, z) = \sum_{n=0}^{\infty} j_n(t, r, z) \cdot \cos(n \cdot \phi), \quad (3)$$

где $j_n(t, r, z) = j_m j(t) \cdot F_n(\phi_0) \cdot \delta(r-R) \cdot \delta(z-h)$,

$$F_n(\phi_0) = \begin{cases} \left(-\frac{2 \cdot \sin(n \cdot \phi_0)}{\pi \cdot n} \right), & n \neq 0, \\ \left(1 - \frac{\phi_0}{\pi} \right), & n = 0. \end{cases}$$

Тогда решение второго уравнения в системе (2)

следует искать в виде ряда:

$$H_z(t, r, \phi, z) = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(t, r, z) \cdot \cos(n \cdot \phi). \quad (4)$$

Подставляя (4) во второе уравнение системы (2), получим неоднородное уравнение Бесселя:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H_{zn}(t, r, z)}{\partial r} \right) - \frac{n^2}{r^2} \frac{\partial^2 H_{zn}(t, r, z)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 H_{zn}(t, r, z)}{\partial z^2} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot j_n(t, r, z)) \quad (5)$$

Условию ограниченности радиального распределения $H_{zn}(t, r, z)$ из уравнения (5) при $r = 0$, $r \rightarrow \infty$ и $n \rightarrow \infty$ удовлетворяет интегральное преобразование Фурье-Бесселя:

$$H_{zn}(t, r, z) = \int_0^{\infty} H_{zn}(t, \lambda, z) \cdot J_n(\lambda \cdot r) \cdot \lambda \cdot d\lambda, \quad (6)$$

где $J_n(\lambda \cdot r)$ – функция Бесселя n -ого порядка, λ – параметр преобразования.

Правая часть уравнения (5) после аналогичного преобразования принимает вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r j_n(t, r, z)) = (j_m j(t)) \int_0^{\infty} K_n(\lambda) \delta(z-h) J_n(\lambda r) \lambda \cdot d\lambda, \quad (7)$$

где

$$K_n(\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r j_n(t, r, z)) J_n(\lambda r) r \cdot dr = F_n(\phi_0) f_n(\lambda);$$

$$f_n(\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial r} (r \delta(r-R)) J_n(\lambda r) dr = R \frac{dJ_n(\lambda R)}{dR} \Big|_{r=R} = \frac{(\lambda \cdot R)}{2} \cdot [J_{n-1}(\lambda \cdot R) - J_{n+1}(\lambda \cdot R)]$$

В соответствии с (6) и (7) уравнение (5) приводится к обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка.

$$\frac{d^2 H_{zn}(t, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 H_{zn}(t, \lambda, z) = - (j_m j(t)) \cdot K_n(\lambda) \cdot \delta(z-h). \quad (8)$$

Решая полученные дифференциальные уравнения относительно нормальной компоненты напряжённости магнитного поля, возбуждаемой в рассматриваемой системе, определяем плотности индуцированных токов.

Пропуская промежуточные вычисления, запишем конечный результат.

Для удобства в расчётах распределения вихревых токов на поверхности пластины целесообразно ввести безразмерную переменную интегрирования – $x = \lambda \cdot R$, $x \in [0, \infty)$, и собственно расчёты производить для относительных величин:

В этом случае для компонент вихревого тока получаем:

$$j_{\phi \text{-отн}} \left(\frac{r}{R}, \phi \right) = \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\phi_0) \cos(n \phi) \times \left[\int_0^{\infty} f_n(x) \left(J_{n-1} \left(x \frac{r}{R} \right) - J_{n+1} \left(x \frac{r}{R} \right) \right) e^{-x \cdot \frac{h}{R}} dx \right]. \quad (9)$$

$$j_{r\text{-отн}}\left(\frac{r}{R}, \phi\right) = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot F_n(\phi_0) \sin(n\phi) \times \left[\int_0^{\infty} f_n(x) \cdot \frac{J_n\left(x \frac{r}{R}\right)}{\left(\frac{r}{R}\right)} \cdot \frac{e^{-x \frac{h}{R}}}{x} dx \right], \quad (10)$$

где

$$F_n(\phi_0) = \begin{cases} \left(-\frac{2 \cdot \sin(n \cdot \phi_0)}{\pi \cdot n} \right), & n \neq 0, \\ \left(1 - \frac{\phi_0}{\pi} \right), & n = 0, \end{cases}$$

$$f_n(x) = \frac{x}{4} \cdot [J_{n-1}(x) - J_{n+1}(x)].$$

Полный ток, индуцированный в металле пластины, будет равен корню квадратному из суммы квадратов составляющих:

$$j_{\text{отн}}\left(\frac{r}{R}, \phi\right) = \sqrt{j_{\phi\text{-отн}}^2\left(\frac{r}{R}, \phi\right) + j_{r\text{-отн}}^2\left(\frac{r}{R}, \phi\right)}. \quad (11)$$

ВИТОК С КОНЕЧНЫМ РАДИАЛЬНЫМ РАЗМЕРОМ

Как было ранее указано, вычисления вихревых токов в проводнике, возбуждаемых полем идеально тонкого кругового соленоида, следует дополнить расчётами для более реального случая, когда виток индуктора обладает конечными радиальными размерами, и плотность возбуждающего тока с равномерным поперечным распределением принимает вид:

$$j_{\varphi i}(t, r, \varphi, z) = j_m(t) [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \delta(z - h) f(\varphi), \quad (12)$$

где η – ступенчатая функция Хевисайда, $R_1 = R$, $R_2 = (R + d)$ – внутренний и внешний радиусы витка индуктора согласно рис. 1

Не повторяя всех проведенных вычислений, можно ограничиться введением нового Фурье-Бесселевого образа – функции $f_n(\lambda)$ в зависимость для $K_n(\lambda)$ в выражении (7) и уравнении (8).

$$\begin{aligned} f_n(\lambda) &= \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)]) \cdot J_n(\lambda r) dr = \\ &= (r \cdot [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)]) \cdot J_n(\lambda r) \Big|_0^{\infty} - \\ &- \int_0^{\infty} (r \cdot [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)]) \cdot \frac{dJ_n(\lambda r)}{dr} dr = \\ &= \int_{R_1}^{R_2} r \frac{dJ_n(\lambda r)}{dr} dr = \frac{\lambda}{2} \int_{R_1}^{R_2} r [J_{n-1}(\lambda r) - J_{n+1}(\lambda r)] dr. \end{aligned} \quad (13)$$

Отметим, что полученное выражение для Фурье-Бесселевого образа равномерного радиального распределения тока в витке в случае аксиальной симметрии его конструкции с точностью до знака и постоянного множителя принимает вид

$$f_n(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda r) dr,$$

что согласуется с аналогичной зависимостью в известных научных изданиях, например, в монографии

Шнеерсона Г.А. [7]

Опуская промежуточные математические операции, запишем выражения для компонент индуцированных токов в относительных величинах:

$$j_{\varphi}^{\text{отн}}(\rho, \varphi) = \left(\frac{R_1}{R_2 - R_1} \right) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\varphi_0) \cos(n\varphi) \times \left[\int_0^{\infty} f_n(x) (J_{n-1}(x\rho) - J_{n+1}(x\rho)) e^{-x \frac{h}{R_1}} dx \right], \quad (14)$$

$$j_{r}^{\text{отн}}(\rho, \varphi) = \left(\frac{R_1}{R_2 - R_1} \right) \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot F_n(\varphi_0) \times \sin(n\varphi) \left[\int_0^{\infty} f_n(x) \frac{J_n(x\rho)}{\rho} \cdot \frac{e^{-x \frac{h}{R_1}}}{x} dx \right]. \quad (15)$$

где

$$f_n(x) = \frac{1}{(4 \cdot x)} \int_x^{\frac{R_2}{R_1} x} y \cdot [J_{n-1}(y) - J_{n+1}(y)] dy;$$

$$j_{\varphi}^{\text{отн}}(r, \varphi) = \frac{j_{\varphi}(t, r, \varphi)}{(-j_m j(t))}, \quad j_r^{\text{отн}}(r, \varphi) = \frac{j_r(t, r, \varphi)}{(-j_m j(t))},$$

$\rho = r/R_1$ – относительная радиальная координата

Сумма квадратов выражений (14) и (15) в формуле (11) представляет собой решение задачи о возбуждении вихревых токов в идеально проводящем объекте полем плоского цилиндрического витка с конечными поперечными размерами и "разрезом", где подключается источник мощности.

ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Вычисления амплитудно-пространственного распределения вихревых токов, возбуждаемых "незамкнутым" одновитковым индуктором в идеально проводящем металлическом объекте, проведём для постоянно-го воздушного зазора между ними – $h/r = 0,1$. Варьирование данной величины и исследование её влияния не представляет интереса, поскольку из априорных физических соображений очевидна роль этого параметра системы.

Особый интерес для практики, в первую очередь, вызывают оценки влияния размеров разреза в витке на амплитуды и распределения индуцированных токов.

Как это видно из рис. 1, величина разреза ("разрыва") определяется в терминах азимутального угла – $2\phi_0$. При проведении расчётов более предпочтительным и репрезентативным представляется введение относительной ширины разреза, определяемого как $\theta = 2\phi_0/(2\pi)$. Фактически, здесь имеет место отношение длины дуги, соответствующей углу разреза, к длине окружности всего витка в целом.

Начнём с идеально тонкого витка над проводящей средой.

Вычисления плотности полного тока, индуцированного в проводнике, проводились по формулам (9) – (11) Наиболее иллюстративные эпюры представлены на рис. 2, 3.

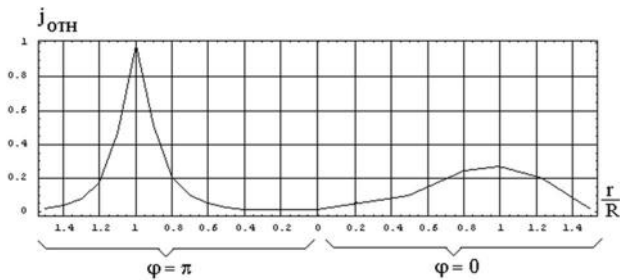


Рис. 2 Распределение плотности индуцированного тока на оси витка, проходящей через центр "разрыва", $\theta = 0.1$

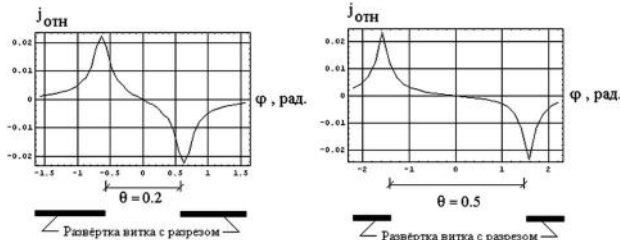


Рис. 3 Азимутальные распределения радиальных компонент индуцированных токов на окружности витка ($r = 1.0$) при различных значениях разрыва

Основные результаты проведенных вычислений сводятся к следующим положениям.

- В зоне под разрезом в витке имеет место существенное нарушение однородности пространственного распределения плотности индуцированных токов и снижение их амплитудных значений (рис.3), что делает недопустимым приближение аксиальной симметрии в расчётах одновитковых индукторных систем.
- Следствием отмеченной неоднородности пространственного распределения является, в первую очередь, снижение интегральной величины индуцированного тока в целом.
- В аксиально-симметричной системе (виток без разреза) возбуждается только азимутальная компонента индуцированного тока.
- Нарушение аксиальной симметрии (виток с разрезом) есть причина появления радиальной составляющей индуцированного тока (рис. 2 и рис. 3).
- Пространственные максимумы радиальных токов располагаются вблизи краёв разреза в витке и имеют разные знаки и (рис. 3), что говорит об их протекании в противоположных направлениях.
- В целом, сравнение полученных распределений индуцированных токов показывает, что пространственная форма полного индуцированного тока формируется, в основном, вкладом азимутальной составляющей.

Напомним, что все выполненные и описанные вычисления относятся к идеализации витка достаточно тонким токопроводом.

Теперь обратимся к витку с заданными радиальными размерами.

Наиболее интересным отличием от предыдущего рассмотрения представляется влияние конечной ширины витка на возбуждение вихревых токов в проводнике.

Расчёты проводились с помощью формул (14), (15), (11) и представлены на рис. 4-6.

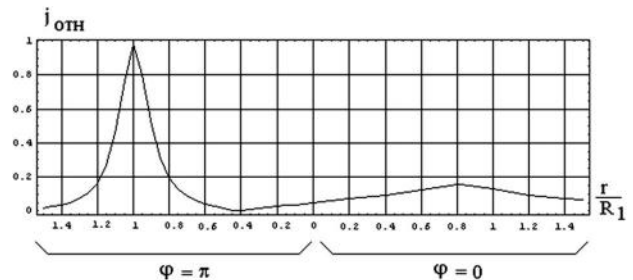


Рис. 4. Распределение плотности индуцированного тока по азимуту, через центр разреза, $\theta = 0.2$ для $d \rightarrow 0$

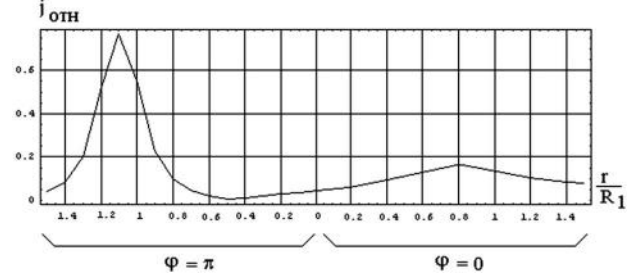


Рис. 5. Распределение плотности индуцированного тока по азимуту, через центр разреза, $\theta = 0.2$ для $d = 0.005$ м

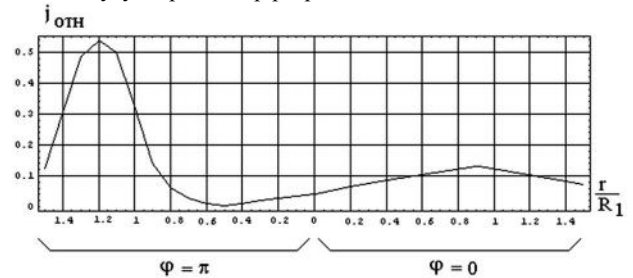


Рис. 6. Распределение плотности индуцированного тока по азимуту, через центр разреза, $\theta = 0.2$ для $d = 0.01$ м

Как показали вычисления, наибольшей иллюстративностью обладают зависимости плотности полных индуцированных токов от относительного радиуса при движении по азимуту, проходящему от сплошной части витка через центр системы и далее через центр разреза, аналогичные приведенной на рис. 2.

К приведенным зависимостям следует добавить, что в расчётах принималось $R_1 = 0.025$ м. Соответственно, значения $d = 0.005$ м и $d = 0.01$ м отвечают относительным величинам $R_2/R_1 = 1.2$ и $R_2/R_1 = 1.4$. Относительное расстояние между витком и проводящей плоскостью сохранялось прежним, $h = 0.1$ (относительно R_1).

Основные выводы по результатам расчётов:

- увеличение радиальных размеров витка приводит к снижению амплитуд возбуждаемых вихревых токов, так при вариации геометрии витка от $(R_2/R_1) \rightarrow 1$ до $(R_2/R_1) \rightarrow 1.4$ максимум амплитуды плотности индуцированного тока падает почти в два раза (рис. 4, 6);
- в области разреза изменение ширины витка практически не меняет амплитуды плотности вихревых токов (рис. 4-6);
- в целом, ширина витка индуктора влияет на амплитуды токов, индуцированных в проводнике, но не изменяет физической картины их пространственно-временного распределения.

ВЫВОДЫ

1. Произведен расчет трехмерной электродинамической задачи пространственно-временного распределения вихревых токов, возбуждаемых полем плоского "незамкнутого" кругового витка конечной толщины в массивном проводнике с высоким значением удельной электропроводности.

2. Выполнено сравнение характеристик электродинамических процессов в рассматриваемой системе при допущении бесконечно тонкого витка и витка конечной ширины.

3. Проведенные исследования показали, что ширина витка индуктора влияет на амплитуды токов, индуцированных в проводнике, но не изменяет физической картины их пространственно-временного распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
2. Гнатов А.В. Электромагнитные процессы в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном и тонкостенной листовой заготовкой // *Электротехника і електромеханіка*. – 2009. – № 6. – С. 46-49.
3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – 270 с.
4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А., Возможности магнитно-импульсной технологии для рихтовки кузовных элементов автомобилей // *Труды 13-ой Международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии"*. Харьков, 19-20 апреля 2007 г. – С. 352-355.
5. Батыгин Ю.В., Головащенко С.Ф., Гнатов А.В., Смирнов Д.О. Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 3. – С. 39-41.
6. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Магнитно-импульсное притяжение листовых металлов – перспективное направление в развитии электромагнитной штамповки // *Технічна електродинаміка*. – К.: Технічна електродинаміка, Тематичний випуск. – 2010. – Ч. 1. – С. 175-180.
7. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
8. Дж. Мэтьюз, Р. Уокер. Математические методы физики. – М: Атомиздат, 1978. – 397 с.
9. Атабеков Г.М. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия, 1980. – Ч. 1. – 340 с.

Bibliography (transliterated): 1. Turenko A.N., Bat'igin Yu.V., Gnatov A.V. Impul'sn'ie magnitn'ie polja dlja progrecivn'ih tehnologi'. Tom 3. Teoriya i ekperiment pritjajenija tonkostenn'ih metallov impul'sn'imi magnitn'imi poljami: Monografija - Harkov: HNADU, 2009. - 240 s. 2. Gnatov A.V. Elektromagnitn'ie protsecci v induktsionno' induktorno' sisteme s odnovitkov'im colenoidom, massivnim ekranom i tonkostenno' listovo' zagotovko' // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2009. - № 6. - С. 46-49. 3. Bat'igin Ju.V., Lavincki' V.I., Impul'sn'ie magnitn'ie polja dlja progrecivn'ih tehnologi'. - Harkov: NTU "HPI", 2001. - 270 s. 4. Bat'igin Ju.V., Lavincki' V.I., Cerikov G.C., CHapl'igin E.A., Vozmojnosti magnitno-impul'sno' tehnologii dlja rihtovki kuzovn'ih elementov avtomobile // *Trud' 13-o' Mejdunarodno' nauchno-tehnicecko' konferentsii "Fizicheckie i kompjutern'ie tehnologii"*. Harkov, 19-20 aprelja 2007 g. - С. 352-355. 5. Bat'igin Ju.V., Golovaschenko C.F., Gnatov A.V., Cmirnov D.O. Ekspierimental'n'ie icclედovanija magnitno-impul'snogo pritjajenija tonkostenn'ih listov'ih metallov // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2010. - № 3. - С. 39-41. 6. Bat'igin Ju.V., Gnatov A.V. Magnitno-impul'snoe pritjajenie listov'ih metallov - perspektivnoe napravlenie v razvitii elektromagnitno' shtampovki // *Tehnicna elektrodinamika*. - K.: Tehnicna elektrodinamika, Tematicni' vipuck. - 2010. - CH. 1. - С. 175-180. 7. SHneercon G.A. Polja i perehodn'ie protsecci v apparature sverh sil'n'ih tokov. - L.: Energoizdat, 1981. - 200 s. 8. Dj.Metjuz, R.Uoker. Matematicheskie metod'i fiziki. - M: Atomizdat, 1978. - 397 s. 9. Atabekov G.M. Teoreticheskie osnov'i elektrotehniki. - M.: Energija, 1980. - CH. 1. - 340 s.

Поступила 20.12.2010

*Батыгин Юрий Викторович, д.т.н., проф.,
Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет
кафедра физики
61002, Харьков, ул. Петровского, 25
тел. (057) 700-368-53, e-mail: batygin48@mail.ru*

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

Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Smirnov D.O.
A finite-width cylindrical coil with a cut over a perfectly conducting bulk conductor.

In the article, a three-dimensional electrodynamic problem of eddy currents space-time distribution is solved, eddy currents excited by the field of an open final-width flat circular coil in a bulk conductor of high specific conductivity. Comparison of obtained results with analogs for an infinitely thin coil is made.

Key words – *width flat circular coil, perfectly conducting bulk conductor, eddy currents space-time distribution.*

ОБ ИСКЛЮЧЕНИИ СЖАТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОСЛЕ "СРЕЗА" ИМПУЛЬСА ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Теоретично підтверджено ефективність ідеї Г. Фюрза про запобігання коливань струму після "зрізу" замиканням індуктора накоротко для виключення обтиску внутрішньої циліндричної провідної оболонки після її магнітно-імпульсного розширення зусиллями від'ємного тиску. Показано також можливості збільшення частоти та амплітуди "зрізаючого" імпульсу, а також від'ємного тиску в порівнянні зі схемою без замикання індуктора накоротко.

Теоретически подтверждена эффективность идеи Г. Фюрза о закорачивании индуктора с целью предотвращения колебаний тока после "среза" для исключения сжатия внутренней цилиндрической проводящей оболочки после ее магнитно-импульсного расширения силами отрицательного давления. Показаны также возможности увеличения частоты и амплитуды "срезающего" импульса, а также отрицательных давлений по сравнению со схемой без закорачивания индуктора.

ВВЕДЕНИЕ

В 1965 г. Г. Фюрз получил патент на устройства для магнитно-импульсной обработки металлических заготовок силами притяжения к индуктору, принцип действия которых основан на прерывании ("срезе") медленно нарастающего исходного импульса разрядного тока [1]. При помощи рис. 1 и 2 напомним один из способов "среза", который анализируется в этой статье. Исходный импульс тока i_1 создается разрядом основного емкостного накопителя C_1 , предварительно заряженного до напряжения U_{01} , через управляемый коммутатор K_1 на индуктор 1 с расположенной внутри него цилиндрической проводящей оболочкой (заготовкой) 2. На этой стадии процесса заготовка 2 не деформируется. Дополнительный емкостный накопитель C_2 предварительно заряжен до напряжения U_{02} так, что полярность его обкладок относительно индуктора 1 противоположна полярности C_1 , причем согласно [1] $C_2 \ll C_1$, а U_{02} может быть намного выше U_{01} . В момент времени $t = t_c$ включается управляемый коммутатор K_2 , и дополнительный накопитель C_2 создает "срезающий" импульс тока i_2 , имеющего противоположное направление. При $t > t_c$ результирующий ток i ("срезанный" импульс тока), протекающий через индуктор 1, быстро уменьшается, в результате чего вихревые токи в заготовке 2 изменяют направление и возникают большие электродинамические усилия (ЭДУ), деформирующие заготовку 2 силами притяжения к индуктору 1.

В работе [2] мы показали, что увеличения скорости "среза", а следовательно, и ЭДУ, расширяющих заготовку при помощи внешнего индуктора, можно добиться увеличением частоты, амплитуды и коэффициента затухания колебательного "срезающего" импульса. Однако значительное увеличение частоты приводит к появлению больших ЭДУ, сжимающих оболочку после ее расширения [2]. Одним из способов, предотвращающих это нежелательное явление, может быть закорачивание индуктора 1 при помощи управляемого коммутатора K_3 в момент времени $t = t_0$, в который ток $i = 0$ [1] (см. рис. 1, 2).

В известных нам работах воздействие на цилиндрическую проводящую оболочку "срезанных" импульсов осевого внешнего магнитного поля, получае-

мых "встречным" разрядом двух емкостных накопителей и закорачиванием внешнего индуктора при переходе результирующего тока i через нулевое значение для исключения сжимающих ЭДУ после "среза", теоретически не исследовали.

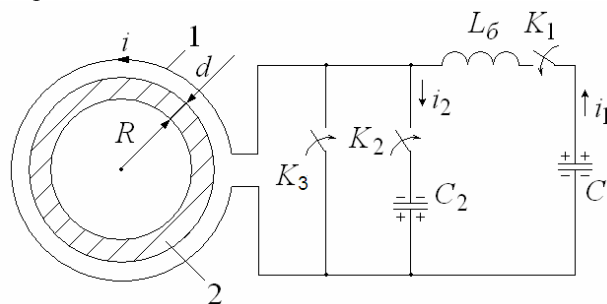


Рис. 1. Схема устройства с прерыванием тока при помощи дополнительного емкостного накопителя и закорачивания индуктора

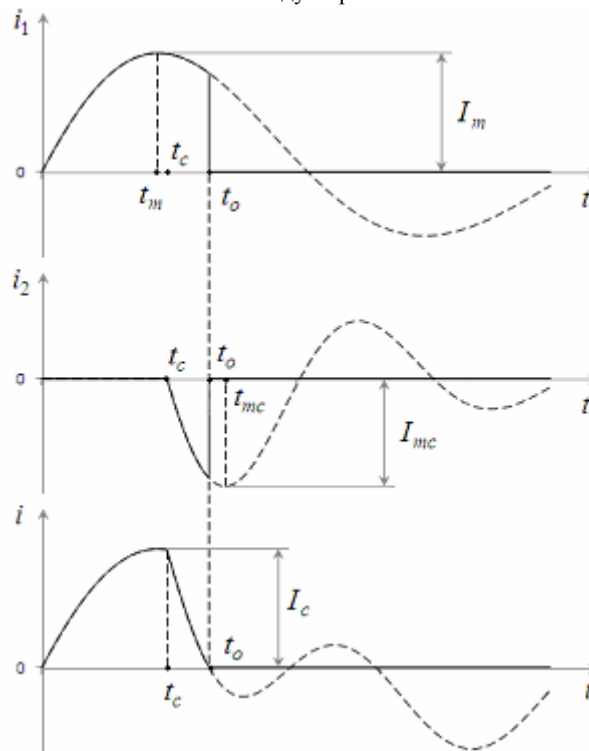


Рис. 2. Исходный (i_1), "срезающий" (i_2) и "срезанный" (i) импульсы тока в схеме с закорачиванием индуктора

ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ УСТРОЙСТВА

Пусть длинная цилиндрическая проводящая оболочка неподвижна, имеет постоянные электрофизические характеристики, а ее толщина d много меньше внутреннего радиуса R (см. рис. 1). Полагаем также, что соблюдаются условия квазистационарности, а вектор напряженности магнитного поля имеет только осевую проекцию, причем магнитное поле снаружи и внутри оболочки однородно.

Представляем "срезанный" импульс тока, протекающего через индуктор, в таком виде:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t), \quad (1)$$

где

$$i_1(t) = [1 - 1(t - t_0)] I_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t; \quad (2)$$

$$i_2(t) = -1(t - t_c) [1 - 1(t - t_0)] I_{01} e^{-\alpha_1 t} \sin \omega_1 t; \quad (3)$$

$1(t - t_0)$, $1(t - t_c)$ – единичные функции;

$$1(t - t_0) = \begin{cases} 1, & t \geq t_0; \\ 0, & t < t_0; \end{cases}$$

$$1(t - t_c) = \begin{cases} 1, & t \geq t_c; \\ 0, & t < t_c; \end{cases}$$

I_0 , I_{01} – постоянные; α , α_1 – коэффициенты затухания; ω , ω_1 – круговые (угловые) частоты.

Формулы (2), (3) отличаются от приведенных в работе [2] дополнительным множителем $[1 - 1(t - t_0)]$, при помощи которого учитывается закорачивание индуктора.

Согласно (1) – (3) напряженность магнитного поля на внешней поверхности оболочки равна

$$H(0, t) = H^{(1)}(0, t) + H^{(2)}(0, t), \quad (4)$$

а на внутренней поверхности –

$$H(d, t) = H^{(1)}(d, t) + H^{(2)}(d, t), \quad (5)$$

где $H^{(1),(2)}(0, t) = i_{1,2} w / b$, w и b – число витков и длина индуктора, причем $b \gg R$.

В формулах (4), (5) функции $H^{(1)}(0, t)$ и $H^{(1)}(d, t)$ соответствуют току $i_1(t)$, а функции $H^{(2)}(0, t)$ и $H^{(2)}(d, t)$ – току $i_2(t)$. Каждую из функций $H^{(1)}(d, t)$ и $H^{(2)}(d, t)$ представляем в виде суммы двух слагаемых:

$$H^{(1)}(d, t) = H_1^{(1)}(d, t) + H_2^{(1)}(d, t); \quad (7)$$

$$H^{(2)}(d, t) = H_1^{(2)}(d, t) + H_2^{(2)}(d, t). \quad (8)$$

Первые слагаемые в формулах (7) и (8) соответствуют "срезу" исходного затухающего колебательного импульса тока i_1 подобным, но с другими параметрами "срезающим" импульсом i_2 [2], а вторые слагаемые – идеальному (мгновенному) "срезу" [3] тех же импульсов в момент времени $t = t_0$, в который $i_2(t_0) = -i_1(t_0)$ (см. рис. 2).

Для нахождения каждой из четырех неизвестных функций в правых частях формул (7), (8) необходимо решить соответствующие задачи проникновения импульсного магнитного поля внутрь цилиндрической проводящей оболочки. Подобные решения для рассматриваемых граничных условий на внешней поверхности оболочки известны [2, 3]. Используем переходную функцию напряженности магнитного поля

на внутренней поверхности оболочки первого приближения [4, 5]

$$H_1(d, t) = 1 - e^{-t/\tau},$$

где τ – постоянная времени первого приближения,

$$\tau = \mu_0 \gamma R d / 2;$$

μ_0 – магнитная постоянная; γ – удельная электропроводность оболочки.

Опуская преобразования, связанные с применением интеграла Дюамеля, получаем:

$$H_1^{(1)}(d, t) = H_0 f(\alpha \tau, \omega \tau) \times \left[e^{-\alpha t} \sin(\omega t - \psi_2^{(1)}) + e^{-t/\tau} \sin \psi_2^{(1)} \right]; \quad (9)$$

$$H_2^{(1)}(d, t) = -H_0 f(\alpha \tau, \omega \tau) e^{-\alpha t_0} \times \left\{ e^{-\alpha t'} \sin[\omega(t' + t_0) - \psi_2^{(1)}] + e^{-t'/\tau} \sin(\psi_2^{(1)} - \omega t_0) \right\}; \quad t > t_0; \quad (10)$$

$$H_1^{(2)}(d, t) = -H_{01} f(\alpha_1 \tau, \omega_1 \tau) \times \left[e^{-\alpha_1 t''} \sin(\omega_1 t'' - \psi_2^{(2)}) + e^{-t''/\tau} \sin \psi_2^{(2)} \right]; \quad t \geq t_c; \quad (11)$$

$$H_2^{(2)}(d, t) = H_{01} f(\alpha_1 \tau, \omega_1 \tau) e^{-\alpha_1(t_0 - t_c)} \times \left\{ e^{-\alpha_1 t'} \sin[\omega_1(t' + t_0 - t_c) - \psi_2^{(2)}] + e^{-t'/\tau} \sin(\psi_2^{(2)} - \omega_1(t_0 - t_c)) \right\}; \quad t > t_0, \quad (12)$$

где $t' = t - t_0$, $t'' = t - t_c$; $H_{0,01} = I_{0,01} w / b$;

$$f(\alpha \tau, \omega \tau) = \left[\sqrt{(1 - \alpha \tau)^2 + (\omega \tau)^2} \right]^{-1}; \quad (13)$$

$$\psi_2^{(1)} = \begin{cases} \arctg \frac{\omega \tau}{1 - \alpha \tau}, & \text{если } \alpha \tau < 1; \\ \pi/2, & \text{если } \alpha \tau = 1; \\ \pi + \arctg \frac{\omega \tau}{1 - \alpha \tau}, & \text{если } \alpha \tau > 1. \end{cases} \quad (14)$$

Величины $f(\alpha_1 \tau, \omega_1 \tau)$ и $\psi_2^{(2)}$ определяются по формулам (13) и (14) после замены в них α и ω соответственно на α_1 и ω_1 .

Формулы (1) – (12) составляют математическую модель первого приближения импульсного магнитного поля устройства для расширения цилиндрической оболочки при помощи внешнего индуктора согласно схеме с закорачиванием индуктора, представленной на рис. 1.

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ОБОЛОЧКУ

Полагаем абсолютную магнитную проницаемость оболочки $\mu = \mu_0$. ЭДУ, действующие на оболочку, будем характеризовать величиной

$$p(t) = \frac{\mu_0}{2} \left[(H(0, t))^2 - (H(d, t))^2 \right], \quad (15)$$

условно называемой давлением магнитного поля. Согласно (15) положительные давления стремятся сжать оболочку, а отрицательные давления – расширить ее силами притяжения к внешнему индуктору (см. рис. 1). Эффективность рассматриваемого устройства будем характеризовать отношением p_{m2}/p_{m1} (кратностью амплитуды отрицательного давления), в котором p_{m1} и p_{m2}

– амплитуды соответственно первой (положительной) и второй (отрицательной) полуволны давления магнитного поля. Очевидно, что значения p_{m2}/p_{m1} отрицательны, однако под увеличением кратности амплитуды отрицательного давления будем понимать увеличение модуля этого отношения.

Длительность (продолжительность) и амплитуда "среза" равны (см. рис. 2):

$$T_c = t_0 - t_c; I_c = i(t_c).$$

Для представления и анализа результатов расчета используем безразмерные величины $i^* = i/I_0$, $H^* = H/H_0$, $\eta^* = \eta/H_0$, $p^* = p/p_0$, $T_c^* = \omega T_c$, $I_c^* = I_c/I_0$, $t_0^* = \omega t_0$ и критерии подобия [2] $\alpha^* = \alpha/\omega$, $\alpha_1^* = \alpha_1/\omega_1$, $\omega_1^* = \omega_1/\omega$, $I_{01}^* = I_{01}/I_0$, $\tau^* = \omega\tau$, $t^* = \omega t$, $t_c^* = \omega t_c$, где $p_0 = \mu_0 H_0^2/2$, η – линейная плотность вихревых токов в оболочке [6].

В работе [2] показано, что в случае затухающего колебательного "срезающего" импульса отрицательные давления возрастают при увеличении значений критериев $\omega_1^* = \omega_1/\omega$, $\alpha_1^* = \alpha_1/\omega_1$ и $I_{01}^* = I_{01}/I_0$. Очевидно, что наиболее удобными на практике средствами увеличения отрицательных давлений являются уменьшение C_2 (при этом увеличиваются ω_1 и ω_1^*) и увеличение U_{02} (при этом увеличиваются I_{01} и I_{01}^*), однако их возможности в схеме без закорачивания индуктора ограничены большими положительными давлениями после "среза".

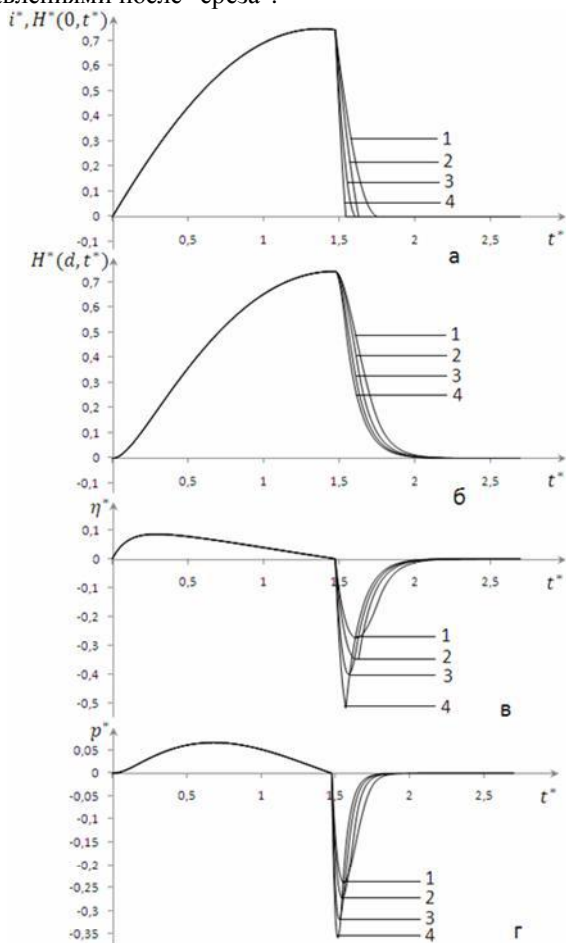


Рис. 3. Влияние амплитуды и частоты "срезающего" импульса на импульсное магнитное поле и ЭДУ, действующие на оболочку при $\alpha_1^* = 0,2$: для кривых 1, 2 – $\omega_1^* = 5$; 3, 4 – 10; для кривой 1 $I_{m2}/I_{m1} = 0,928$; 2 – 1,2; 3 – 0,9711; 4 – 1,3

В расчетах, результаты которых показаны на рис. 3 и в табл., принято $\alpha^* = 0,2$, $\tau^* = 0,1$ (такое значение τ^* соответствует хорошему проникновению магнитного поля внутрь оболочки [5]), $t_c^* = \omega t_{mi} = 1,47508$ (t_{mi} – момент времени, в который напряженность магнитного поля $H(d, t)$ принимает максимальное значение). При этом амплитуда среза $I_c^* = 0,741$.

На рис. 3 изображены типичные зависимости напряженностей импульсного магнитного поля (а, б), линейной плотности вихревых токов в оболочке (в) и давления магнитного поля от времени (г), полученные при помощи описанной выше математической модели и вполне адекватные физическим процессам в рассматриваемом устройстве. Видим, что закорачивание индуктора действительно исключает третью, положительную полуволну давления, которая может вызвать нежелательное сжатие оболочки. Это открывает возможность увеличения круговой частоты "срезающего" импульса и его амплитуды для увеличения отрицательных давлений по сравнению со схемой без закорачивания индуктора. Сказанное иллюстрируется данными табл. (для сравнения см. [2, с. 56, 57, табл. 1, 2]), в которой приведены также значения отношения амплитуд "срезающего" и исходного импульсов тока I_{m2}/I_{m1} (см. рис. 2) и производной результирующего тока (в безразмерной форме). Последняя величина характеризует скорость "среза". Каждому значению критерия ω_1^* соответствуют три значения отношения I_{m2}/I_{m1} , из которых первое подобрано так, чтобы производная тока i при $t^* = t_0 - 0$ была близка к нулю, а для двух остальных $I_{m2}/I_{m1} > 1$. Кратности амплитуд отрицательных давлений значительно ближе к случаю идеального "среза", чем при использовании импульсов относительно низкой частоты [2, табл. 1-3].

Как мы уже отмечали [2], при увеличении коэффициента затухания "срезающего" импульса и соответственно значения критерия α_1^* возрастает скорость "среза", а следовательно, и кратность амплитуды отрицательного давления. Однако при $\alpha_1^* = 0,8$ для достижения определенной величины p_{m2}/p_{m1} требуется значительно большее значение критерия I_{01}^* и соответственно напряжения U_{02} , поскольку $I_{01} \sim U_{02}$, чем при $\alpha_1^* = 0,2$ (см. табл.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Математическая модель магнитно-импульсного расширения цилиндрической проводящей оболочки при помощи "встречного" разряда двух емкостных накопителей на внешний индуктор и закорачивания последнего при переходе результирующего тока через нулевое значение в момент времени $t = t_0$ может быть представлена суперпозицией магнитных полей, создаваемых идеально "срезанными" при $t = t_0$ исходным и "срезающим" импульсами тока.

2. При закорачивании индуктора возможно использование "срезающих" импульсов с очень высокой скоростью изменения, для которых форма "среза" и кратность амплитуды отрицательного давления приближаются к идеальному. При этом "срезающие" импульсы могут иметь большую амплитуду, меньший коэффициент затухания и высокую частоту, для которой $\omega_1^* > 5$ (рис.3,а, кривая 4; табл., $\omega_1^* = 10, 20$).

Основные характеристики "срезанного" импульса тока и давления магнитного поля в схеме с закорачиванием индуктора

ω_1^*	$\alpha_1^* = 0,8$							$\alpha_1^* = 0,2$					
	I_{01}^*	I_{mc}/I_m	T_c^*	t_0^*	di^*/dt^*		p_{m2}/p_{m1}	$I_{mc}/I_m = I_{01}^*$	T_c^*	t_0^*	di^*/dt^*		p_{m2}/p_{m1}
					$t^* = t_c + 0$	$t^* = t_0 - 0$					$t^* = t_c + 0$	$t^* = t_0 - 0$	
5	1,875	0,960	0,185	1,660	-9,454	-0,043	-4,52	0,928	0,290	1,765	-4,717	-0,004	-3,59
	2,2	1,126	0,106	1,581	-11,077	-3,457	-4,86	1,2	0,155	1,630	-6,077	-3,141	-4,09
	2,4	1,228	0,090	1,565	-12,077	-4,773	-5,05	1,4	0,125	1,600	-7,077	-4,455	-4,38
10	1,918	0,981	0,091	1,566	-19,254	0,013	-5,58	0,971	0,139	1,614	-9,787	-0,057	-4,77
	2,2	1,126	0,054	1,529	-22,077	-6,510	-5,87	1,2	0,079	1,554	-12,077	-5,898	-5,20
	2,4	1,228	0,045	1,526	-24,077	-7,830	-6,04	1,4	0,063	1,538	-14,077	-8,650	-5,50
20	1,933	0,989	0,045	1,520	-38,737	-0,053	-6,46	0,985	0,069	1,544	-19,777	-0,051	-5,82
	2,2	1,126	0,027	1,502	-44,077	-12,919	-6,70	1,228	0,038	1,513	-24,641	-12,524	-6,24
	2,4	1,228	0,023	1,498	-48,077	-18,148	-6,84	1,4	0,032	1,507	-28,077	-16,954	-6,45

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Furth H.P. Devices for metal-forming by magnetic tension. – United States Patent. – №3.196.649. – Cl.72-56. – 1965.
2. Живанков К.И., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Электродинамические усилия, деформирующие цилиндрическую оболочку при "срезе" внешнего магнитного поля колебательным импульсом // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 6. – С. 53-59.
3. Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Влияние формы импульса внешнего магнитного поля на электродинамические усилия, деформирующие цилиндрическую оболочку // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 6. – С. 15-19.
4. Витков М.Г. Проникновение импульсного магнитного поля внутрь цилиндрического экрана // Журнал технической физики. – 1965. – № 3. – С. 410-413.
5. Бондина Н.Н., Крамчанин Е.Г., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Электродинамические усилия, действующие на цилиндрическую оболочку при колебательном разряде магнитно-импульсной установки // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 5. – С. 66-70.
6. Борцов А.В., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Физическое моделирование проникновения "срезанных" импульсов магнитного поля в цилиндрическую проводящую оболочку // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 5. – С. 90-95.

Bibliography (transliterated): 1. Furth H.P. Devices for metal-forming by magnetic tension. - United States Patent. - №3.196.649. - Cl.72-56. - 1965. 2. Jivankov K.I., Ljutenko L.A., Miha'lov V.M. Elektrodinamicheckie ucilija, deformirujuschie tsilindricheckuju obolochku pri "creze" vneshego magnitnogo polja kolebateln'im impulcom // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 6. - С. 53-59. 3. Ljutenko L.A., Miha'lov V.M. Vlijanie form'i impulsa vneshego magnitnogo polja na elektrodinamicheckie ucilija, deformirujuschie tsilindricheckuju obolochku // Tehnichna elektrodinamika. - 2007. - № 6. - С. 15-19.

4. Vitkov M.G. Pronikновение impulsnogo magnitnogo polja vnutr tsilindricheckogo ekrana // Jurnal tehnichecko' fiziki. - 1965. - № 3. - С. 410-413. 5. Bondina N.N., Kramchanin E.G., Ljutenko L.A., Miha'lov V.M. Elektrodinamicheckie ucilija, de'ctvujuschie na tsilindricheckuju obolochku pri kolebatelnom razrjade magnitno-impulcno' ustanovki // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2007. - № 5. - С. 66-70. 6. Bortsov A.V., Ljutenko L.A., Miha'lov V.M. Fizicheckoe modelirovanie proniknovenija "crezann'ih" impulcov magnitnogo polja v tsilindricheckuju provodjaschuju obolochku // Tehnichna elektrodinamika. Tematichni' випуск "Problemi suchasnoї elektrotehniki". - 2008. - Ч. 5. - С. 90-95.

Поступила 11.12.2010

*Живанков Кирилл Игоревич,
Михайлов Валерий Михайлович, д.т.н, проф.*
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
кафедра инженерной электрофизики
61002, Харьков, ул.Фрунзе, 21
тел. (057) 707-60-52

Zhivankov K.I., Mikhailov V.M.

About avoidance of cylindrical shell compression after external magnetic field pulse shaving.

Furth's idea of inductor shorting to prevent current oscillations after pulse shaving for avoidance of internal cylindrical conducting shell compression after the shell magnetic-impulse extension by negative pressure forces is theoretically verified. Feasibility of the shaving impulse frequency and magnitude increase along with negative pressure gain is also shown as compared with a scheme without inductor shorting.

Key words – pulsed magnetic field pressure, cylindrical conducting shell compression, external field interruption, coil shorting.

ДИАГНОСТИКА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПО ТАНГЕНСУ УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ САМОРАЗРЯДА БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Запропоновано розповсюдити досвід контролю технічного стану силових кабелів з паперово-просякнутою ізоляцією АЕС на кабелі енергомереж. Введена класифікація дефектів кабельних ліній за тангенсом кута діелектричних втрат та сталою часу саморозряду. Наведені результати технічної діагностики силових кабельних ліній в експлуатації.

Предложено распространить опыт контроля технического состояния силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией АЭС на кабели энергосистем. Введена классификация дефектов кабельных линий по тангенсу угла диэлектрических потерь и постоянной времени саморазряда. Приведены результаты технической диагностики силовых кабельных линий в эксплуатации.

ВВЕДЕНИЕ

Кабели с бумажно-масляной изоляцией являются основными в городских и областных кабельных сетях напряжением 6-10 кВ. Их доля составляет свыше 99%. Статистические данные о техническом состоянии силовых кабельных линий (КЛ) напряжением 6-10 кВ свидетельствуют, что только около одной трети таких линий находятся в удовлетворительном состоянии, а остальные – в неудовлетворительном. Причем на отдельных предприятиях доля проблемных КЛ превышает 80% за счет неудовлетворительного технического состояния концевых и соединительных кабельных муфт. Более 50% КЛ необходимо менять либо полностью, либо частично, а остальные КЛ могут быть приведены в рабочее состояние лишь после проведения ремонта концевых или соединительных муфт [1-2].

В эксплуатации до сих пор находятся кабели 1950 г. выпуска и более поздние, наработка которых составляет от 25 до 59 лет. При очередном пробое каждый раз возникает вопрос: является ли причиной недопустимый общий износ изоляции или же локальный дефект кабеля, который можно устранить с установкой новой соединительной муфты? Ответ на этот вопрос дают не типовые [3], а диагностические испытания кабелей [1-2].

На сегодня известно около четырех десятков параметров, чувствительных к состоянию кабелей [4, 5]. Большая часть их касается, в основном, кабелей с полимерной изоляцией, работающих в гермозонах АЭС. При обследовании этих кабелей был замечен ряд закономерностей изменения тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ изоляции в процессе старения.

1. Сильная корреляционная зависимость между $\text{tg}\delta$ изоляции соседних жил, обусловленная накоплением низкомолекулярных продуктов (НМП) разложения изоляции в промежутках между соседними, соприкасающимися друг с другом жилами.

2. Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ межфазного пространства многожильных кабелей оказывается почти на порядок выше, чем собственно изоляции жил, что также связывается с накоплением НМП на поверхности изоляции.

3. В процессе дополнительного ускоренного теплового старения образцов состаренных кабелей наблюдается снижение $\text{tg}\delta$ на частоте 100 Гц – из-за улетучивания НМП из коротких не герметизирован-

ных образцов, но рост $\text{tg}\delta$ на частоте 10 кГц, обусловленный дальнейшим окислением полимерной изоляции [5].

При обследовании образцов силовых кабелей было установлено различие $\text{tg}\delta$ фазной и поясной изоляции. Предложены методики выделения свойств этих компонентов изоляции из результатов совокупных измерений их характеристик [6].

Цель статьи: распространение опыта диагностики кабелей АЭС на силовые кабели энергосистем по тангенсу угла диэлектрических потерь и постоянной времени саморазряда изоляции.

ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Однако распространение опыта диагностики на КЛ энергосистем связано с рядом особенностей:

1. В отличие от коротких кабелей АЭС (длиной около сотни метров, обследование которых можно выполнять в диапазоне частот до 10 кГц) для длинных кабелей энергосистем (длиной до 5 км) необходимо ограничиться частотой 50 Гц. Это позволяет избежать резонансных явлений, искажающих результаты измерений $\text{tg}\delta$.

2. Ограниченное количество образцов кабелей энергосистем, которые можно испытать в лабораторных условиях: только короткие отрезки, получаемые во время ремонтных работ. Их использовали для определения усталостной прочности на излом изоляционных бумаг – параметра, весьма чувствительного к старению и меняющегося в процессе эксплуатации монотонно: от $N = 2000$ в исходном состоянии до $N = 10-50$ в состоянии, которое можно принять за конечное [7]. По корреляционной связи между усталостной прочностью бумаги и $\text{tg}\delta$ определены уровни потерь, характеризующие техническое состояние кабелей:

- а) 0,4 % и меньше – нормальное состояние изоляции;
- б) 0,4-0,6 % – есть начальные признаки старения изоляции;
- в) 0,6-0,8 % – умеренное старение изоляции (соответствующее, как показывают результаты усталостных испытаний кабельных бумаг на излом, исчерпанию около $\frac{3}{4}$ ресурса);
- г) 0,8-2 % – критическое состояние изоляции, требующее ремонта линии;

д) свыше 2 % – опасное состояние, которое может привести к тепловому пробоему кабеля.

3. Использование нового цифрового автоматического измерителя диэлектрических потерь ИПИ-10. Измеритель позволяет быстро проводить измерения емкости и $\text{tg}\delta$ при напряжениях на линии до 10 кВ.

Диагностика КЛ проводится на постоянном и на переменном напряжении.

На постоянном напряжении измеряются: сопротивление изоляционных промежутков; токи утечки.

Измерения на *постоянном* напряжении позволяют выявить локальные дефекты КЛ – утечки, которые чаще всего бывают в соединительных и концевых муфтах.

На переменном напряжении частоты 50 Гц измеряются емкость C и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$.

Измерения на *переменном* напряжении позволяют выявить общие ухудшения качества изоляции, обусловленные ее старением [5-6].

Таким образом, сравнивая результаты измерений на постоянном и переменном напряжении, можно уточнить характер дефекта.

Сопротивление изоляции и емкость КЛ зависят от ее длины. Для корректного сопоставления результатов измерений КЛ разных длин вводится параметр, не зависящий ни от длины кабеля, ни от толщины изоляции – *постоянная времени* саморазряда изоляции θ . Это объективный показатель качества, который не зависит от геометрических размеров изоляции.

Сопротивление изоляции R и емкость C позволяют определить постоянную времени саморазряда изоляции, [с]

$$\theta = R \cdot C. \quad (1)$$

Действительно, сопротивление изоляционного промежутка толщиной h , с электродами площадью S равно, [Ом·м]

$$R = \rho \frac{h}{S}, \quad (2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала изоляции.

Емкость этого же промежутка равна, [Ф/м]

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{h}, \quad (3)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала между обкладками, т.е. изоляции; ε_0 – электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Тогда для постоянной времени саморазряда θ получаем выражение, не зависящее от толщины изоляционного промежутка и его площади, [с]:

$$\theta = R \cdot \tilde{N} = \rho \frac{h}{S} \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{h} = \rho \cdot \varepsilon_0. \quad (4)$$

Параметр $\theta = RC$ имеет размерность времени. Как известно, саморазряд изоляции (разряд на собственное сопротивление) идет по экспоненциальному закону

$$u(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (5)$$

где U_0 – первоначальное напряжение на изоляции (напряжение, до которого заряжена емкость изоляции); $u(t)$ – текущее напряжение на изоляции (в мо-

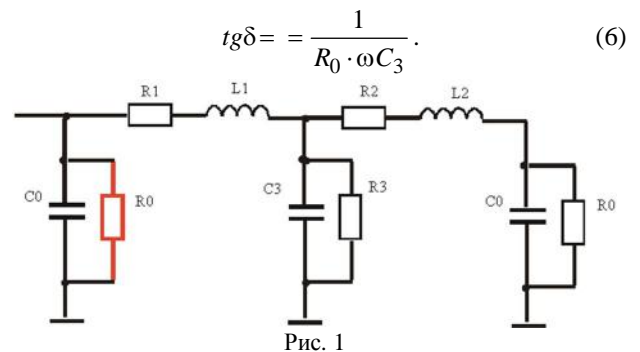
мент времени t).

Поэтому физический смысл параметра $\theta = RC$ состоит в следующем: это интервал времени, в течение которого напряжение на изоляции уменьшается в $e = 2,71828 \dots$ раз.

Классификация дефектов кабельной линии по постоянной времени саморазряда и $\text{tg}\delta$. Представим кабельную линию с концевыми муфтами схемой замещения рис. 1, в которой учитываются параметры концевых муфт и кабеля: R_0, C_0 – сопротивление утечки и собственная емкость концевой муфты; R_3, C_3 – сопротивление утечки и емкость кабеля; R_1, L_1 – активное сопротивление и индуктивность половины кабеля; R_2, L_2 – те же параметры второй половины кабеля.

Допустим, что сопротивление R_0 одной из муфт – пониженное (выделено цветом на рис. 1). Этот дефект проявляется при измерениях на постоянном напряжении в пониженном сопротивлении трассы.

Измерения на переменном напряжении могут дать вполне приемлемый тангенс угла диэлектрических потерь, который определяется пониженным значением R_0 и относительно большой емкостью C_3 кабеля



Например, при $R_0 = 10$ МОм и $C_3 = 50$ нФ, когда постоянная времени саморазряда трассы составляет всего 0,5 с ($\theta = R_0 \cdot C_3 = 10 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-9} = 0,5$ с), получается вполне приемлемое значение $\text{tg}\delta$

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{10 \cdot 10^6 \cdot 314 \cdot 50 \cdot 10^{-9}} = 0,0064 = 0,64\%.$$

Возможна и обратная ситуация, когда при высоком сопротивлении трассы уровень $\text{tg}\delta$ окажется повышенным. Этот случай чаще всего связан именно с общим старением изоляции кабеля, т.к. диэлектрические потери в муфте, собственная емкость которой много меньше емкости кабеля, пренебрежимо малы.

Таким образом, сравнивая результаты измерений на постоянном и переменном напряжении, можно уточнить характер дефекта.

1) Если постоянная времени саморазряда мала ($\theta < 1-10$ с) и $\text{tg}\delta$ относительно низкий ($\text{tg}\delta < 0,5-0,8\%$), то причиной дефекта есть локальный участок с малой емкостью, т.е., скорее всего, муфта.

2) Если постоянная времени саморазряда большая ($\theta > 10-100$ с) и $\text{tg}\delta$ относительно высокий ($\text{tg}\delta > 0,8-2\%$), то дефектным элементом является сам кабель.

3) Признаками нормального состояния изоляции трассы являются высокая постоянная времени саморазряда ($\theta > 10-100$ с) и низкий уровень $\text{tg}\delta$ ($\text{tg}\delta < 0,5-0,8\%$).

4) Наконец, ситуация, когда постоянная времени саморазряда мала ($\theta < 1-10$ с) и вместе с тем уровень

$\text{tg}\delta$ высокий ($\text{tg}\delta > 0,8-2\%$) должна интерпретироваться как случай, когда дефективными являются и муфта и кабель.

Все возможные ситуации соотношений параметров постоянной времени саморазряда изоляции θ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ даны в табл. 1.

Таблица 1
Признаки дефектов элементов кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией

	$\text{tg}\delta < 0,5-0,8\%$	$\text{tg}\delta > 0,8-2\%$
$\theta < 1-10\text{ с}$	Муфта	Муфта и кабель
$\theta > 10-100\text{ с}$	Нормальное состояние	Кабель

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Обследовано 29 кабельных линий "Полтавоблэнерго" (табл. 2). У всех кабелей сухая разделка концевых воронок с двух сторон.

Таблица 2
Технические данные части обследованных КЛ "Полтавоблэнерго"

№	Тип кабеля	Длина линии, м	Количество соединительных муфт	Особенности прокладки /год прокладки	Средняя токовая нагрузка, А
1.	ААШВ-3х95-10 кВ	240	2	в грунте/1967	10
3.	ААБ-3х120-10 кВ	250	2	в грунте/1967	5
4.	ААБ-3х120-10 кВ Повреждена фаза С	2450	Неизвестно	в грунте/1950	30
5.	ААШВ-3х75-10 кВ	270	3	в грунте/неизвестен	3,5
6.	ААБ-3х75-10 кВ	290	4	в грунте/неизвестен	3,5
7.	АШВ-3х120-10 кВ	440	4	в грунте/1992	3,5
8.	АШВ-2х95-10 кВ	40	1	в грунте/1992	2
17.	АШВ-3х70-10 кВ	220	Неизвестно	в грунте/неизвестен	35-40
18.	ААБ-3х120-10 кВ	120	2	в грунте/1967	2-5
19.	ААБ-3х120-10 кВ	85	2	в грунте/1967	8-10
20.	ААБ-3х150-10 кВ	230	4	в грунте/1970	3-5
22.	ААБ-3х120-6 кВ (605м), СБ-3х50-8 кВ (510м), ААШВ-3х120-6 кВ (100м)	1215	Неизвестно	в грунте/1924	80
23.	ААБ-3х50-6 кВ	450	Неизвестно	в грунте/1979	50
26.	ААБ-3х70-10 кВ	230	2	в грунте, после ремонта/1976	7

Для каждой из КЛ емкость и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись при испытательных напряжениях промышленной частоты 2, 5 и 8 кВ по 7-ми схемам обследования:

- "Жила – против всех остальных и оболочки": А – О; В – О; С – О (3 измерения для каждой из жил:);
- "Три жилы вместе – против оболочки": А, В, С – О (1 измерение);
- "Измерение изоляционного промежутка между двумя wybranными жилами; токи третьей жилы и

оболочки отводятся на экран": А – В, А – С, В – С (3 измерения).

Первая и вторая схемы приводят к совокупным, третья – к прямым измерениям параметров изоляционных промежутков. По первой схеме диагностируется, в основном, состояние фазной изоляции, по второй – поясной, по третьей – межфазного пространства. По результатам совокупных измерений емкости и $\text{tg}\delta$ определялись индивидуальные характеристики фазной и поясной изоляции на основе решения систем линейных алгебраических уравнений [6].

На постоянном напряжении величиной от 2,5 кВ до 40 кВ измерялись сопротивление изоляции при напряжении 2,5 кВ и ток утечки. Испытательное напряжение к кабелю подводилось через высоковольтный измеритель тока, установленный на высоковольтном фильтрующем конденсаторе.

Измерения при постоянном напряжении 2,5 кВ выполнялись по двум схемам "фаза – все остальные" (три измерения) и "фаза – фаза" (три измерения) (условно обозначенных как А-С и А-В – соответственно). Измерения при более высоких напряжениях выполнялись по схеме А-С.

Сопротивление изоляции при испытательном напряжении более 2,5 кВ определялось по результатам измерений напряжения и тока утечки. Затем определялась постоянная времени саморазряда $\theta = R \cdot C$.

Ниже представлены результаты анализа технического состояния выборочных кабельных линий по признакам, приведенным в табл. 2. На рис. 2, 4, 5 – статистически обработанные результаты обследования по емкости и тангенсу угла диэлектрических потерь, на рис. 3, 6, 7 – постоянные времени саморазряда от приложенного постоянного напряжения для трех кабельных групп соответственно.

1. Группа кабелей № 1-4

Для кабеля №4 наблюдается рост $\text{tg}\delta$ с ростом напряжения (рис. 2), что связано с активизацией воздушных включений, которые есть в муфтах или самом кабеле. В данном случае при напряжении 8 кВ уровень $\text{tg}\delta$ для поясной изоляции составляет 1,5 %, а для межфазной – 2 %. Воздушных включений в межфазной изоляции, вероятно, больше, чем в поясной.

После ремонта (обозначен как 4v) уровень $\text{tg}\delta$ понизился, но остался в области (от 0,6 до 0,8 %), которая рассматривается как область умеренно состаренной изоляции. Относительно высокий уровень $\text{tg}\delta$ данного кабеля может быть результатом теплового старения изоляции фаз в течение почти 60-летней эксплуатации.

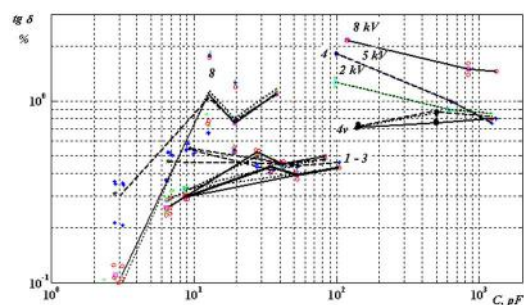


Рис. 2

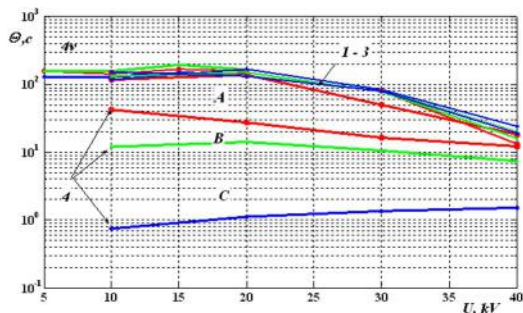


Рис. 3

Как видно из рис. 3, постоянные времени саморазряда изоляции здоровых фаз образца кабеля № 4 находятся на уровне $\theta = R \cdot C = (U/I_y) \cdot C \approx 100$ с, что сопоставимо с кабелями №№1-3 и вполне удовлетворительно для длинного кабеля, содержащего множество муфт. Для нового кабеля параметр $\theta = R \cdot C$ обычно составляет несколько тысяч. Характеристики остальных кабелей этой группы №№ 1-3 вполне удовлетворительные как на постоянном, так и на переменном напряжении.

2. Группа кабелей № 5-9

Старение изоляции кабелей отражается на увеличении уровней $\text{tg} \delta$ поясной изоляции по сравнению с межфазной (рис. 4). Однако максимальные значения $\text{tg} \delta$ находятся на уровне 1 %, что можно считать вполне удовлетворительным результатом.

На зависимостях от напряжения постоянных времени саморазряда выделяется группа из 4-5 результатов, для которой параметр $\theta = R \cdot C$ снижается до 12 с при напряжении 40 кВ (рис. 5). Эта группа определяет более состаренные кабели по сравнению с остальными.

Из рис. 5 видны также пониженные значения параметра $\theta = R \cdot C$ для короткого кабеля № 8 (нижнее семейство кривых) (длиной всего 40 м). Учитывая, что для этого кабеля средняя токовая нагрузка была всего 2 А (средняя плотность тока $j = I/S = 2 \text{ А} / 95 \text{ мм}^2 \approx 0,02 \text{ А/мм}^2$), маловероятным представляется тепловое старение его изоляции, если в процессе эксплуатации не было длительных перегрузок. Величина $\text{tg} \delta$ находится на уровне 1-1,5 %, но вполне допустимо для кабелей, длительно находящихся в эксплуатации. Таким образом, в кабеле № 8 можем предположить наличие локального дефекта – муфты с пониженным сопротивлением изоляции.

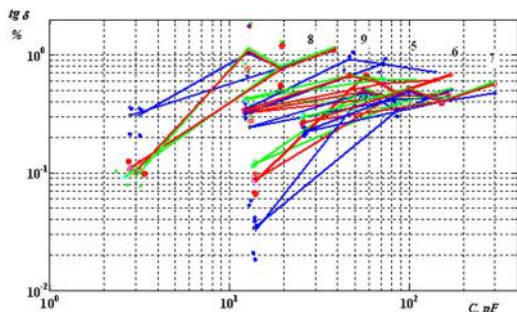


Рис. 4

3. Третья группа кабелей № 16-20

Наименьшие постоянные времени саморазряда – у кабелей № 16 и № 17. Учитывая, что для них характерен низкий уровень $\text{tg} \delta$ (см. рис. 6), можем заклю-

чить, что причиной пониженного значения постоянных времени кабелей № 16 и № 17 (рис. 7) есть дефекты муфт (увлажнения).

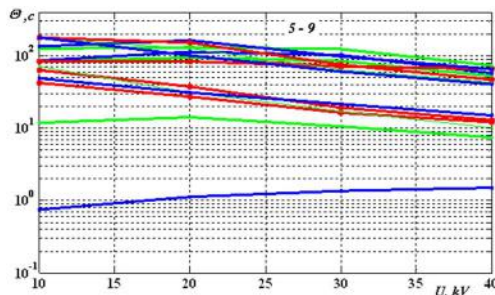


Рис. 5

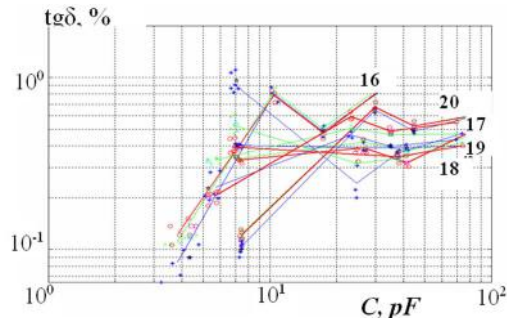


Рис. 6

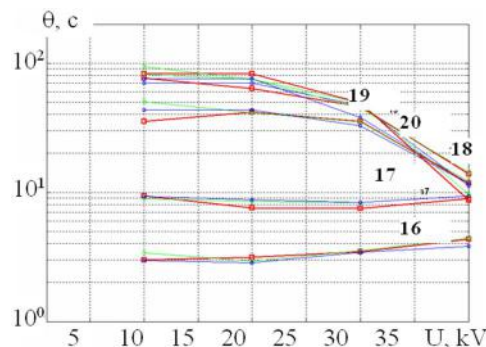


Рис. 7

На рис. 8 приведена зависимость тока утечки от приложенного постоянного напряжения для всех обследованных кабельных линий. Видно, что сама по себе величина тока утечки – плохой показатель качества изоляции. Разброс этого параметра составляет свыше одного порядка. Сказывается зависимость тока утечки от длины кабельной трассы. Поэтому более объективные данные для сравнения кабелей можно получить из зависимостей постоянных времени от напряжения – рис. 3, 5, 7.

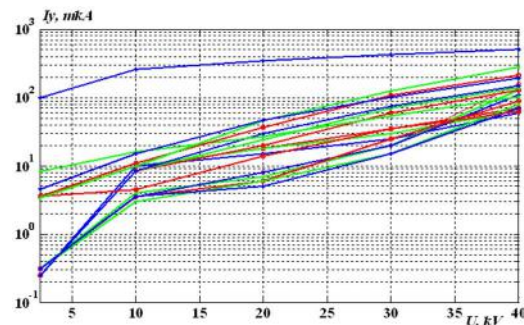


Рис. 8

ВЫВОДЫ

1. Теоретические и экспериментальные наработки, накопленные при диагностике силовых кабелей АЭС, могут применяться для контроля и оценки технического состояния силовых кабельных линий энергосистем.

2. Измерения на постоянном и на переменном напряжении позволяют выделить 4 ситуации (см. табл. 2), т.е. распознать вид дефекта КЛ.

3. Техническое состояние обследованных силовых кабелей вполне удовлетворительное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Привалов И.Н. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6-35 кВ / И.Н. Привалов // Электротехнический рынок. – 2008. – № 2.
2. Кадомская К.П. Метод импульсной диагностики соединительных муфт и оболочек силовых кабелей / К.П. Кадомская, В.В. Сахно // Электричество. – 2000. – № 12. – С. 12-17.
3. Норми випробувань силових кабельних ліній напругою до 500 кВ – К.: КВЦ, 2009. – 50 с.
4. Мониторинг технического состояния и оценка остаточного срока службы силовых кабелей среднего и низкого напряжения с полиэтиленовой изоляцией. – М.: Росэнергоатом, 2000. – 24 с.
5. Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений / А.В. Беспрозванных // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 30-37.
6. Беспрозванных А.В./ Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке / А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, Е.С. Москвитин // Электричество. – 2010. – № 1. – С. 48-54.
7. Москвитин Е.С. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей с бумажно-масляной изоляцией по числу двойных перегибов / Е.С. Москвитин // Вестник НТУ "ХПИ". – 2006. – № 34. – С. 34-40.

Bibliography (transliterated): 1. Privalov I.N. Nerazrushajuschaja diagnostika cilov'ih kabeln'ih lini' nominal'n'im naprjajenim 6-35 kV / I.N. Privalov // Elektrotehnichecki' r'ynok. - 2008. - № 2. 2. Kadomckaja K.P. Metod impulcno' diagnostiki coeditel'n'ih muft i obolochek cilov'ih kabele' / K.P. Kadomckaja, V.V. Sahno // Elektrichestvo. - 2000. - № 12. - С. 12-17. 3. Normi viprobuvan cilovih kabelnih lini' naprugoju do 500 kV - К.: KVITS, 2009. - 50 с. 4. Monitoring tehnicheckogo sostojanija i otsenka octatochnogo croka clujb'i cilov'ih

kabele' srednego i nizkogo naprjajenija s polietilenovo' izoljatsie'. - М.: Rosenergoatom, 2000. - 24 с. 5. Беспрозванных А.В. Dielektricheskoe skanirovanie poperechno' cstruktur'i mnogojiln'ih kabele' metodom covokupn'ih izmereni' / А.В. Беспрозванных // Tehnichna elektrodinamika. - 2008. - № 3. - С. 30-37. 6. Беспрозванных А.В./ Obledovanie izoljatsii trehfazn'ih kabele' v metallichecko' obolochke / А.В. Беспрозванных, B.G. Naboka, E.C. Moskvitin // Elektrichestvo. - 2010. - № 1. - С. 48-54. 7. Москвитин Е.С. Otsenka tehnicheckogo sostojanija v'icokovoltn'ih kabele' s bumajno-macljano' izoljatsie' po chislu dvo'n'ih peregibov / Е.С. Москвитин // Vestnik NTU "HPI". - 2006. - №34. - С. 34-40.

Поступила 16.11.2010

Набока Борис Григорьевич, д.т.н., проф.,
Беспрозванных Анна Викторовна, д.т.н., проф.,
Москвитин Евгений Сергеевич
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"
61002, Харьков, ул.Фрунзе, 21
тел. (057) 701060, e-mail: bezprozvannych@kpi.kharkov.ua

Бутко М.В.,
Бутко С.М.
фирма "STEKS"

Головань А.А.
"Полтавоблэнерго"

B.G. Naboka, A.V. Bezprozvannych, E.S. Moskvitin, M.V. Bytko,
S.M. Bytko, A.A. Golovan

Diagnostics of power system cable lines on dielectric dissipation factor and impregnated-paper insulation self-discharge time constant.

The paper suggests extending the experience of impregnated-paper-insulated power cables technical condition maintenance to power supply system cables. Classification of cable line defects according to dielectric dissipation factor and impregnated-paper insulation self-discharge time constant is introduced. Results of technical diagnostics of power cable lines in operation are given.

Key words – cable lines, technical condition maintenance, cable line defects, impregnated-paper insulation, dielectric dissipation factor, self-discharge time constant.

О ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Проаналізована нормативна база забезпечення пожежної безпеки електротехнічних виробів (ЕТВ). Виконано порівняльний аналіз інтерпретації вимог діючої нормативної бази фахівцями ТК25 (УкрНДІ ПБ, м. Київ) та їх російськими колегами в галузі пожежної безпеки. Наведені технічно обґрунтовані пропозиції щодо коригування нормативної бази з метою забезпечення пожежної безпеки ЕТВ, достовірності результатів сертифікації ЕТВ з показників безпеки, збільшення експортного потенціалу вітчизняних ЕТВ.

Проанализирована нормативная база обеспечения пожарной безопасности электротехнических изделий (ЭТИ). Выполнен сравнительный анализ интерпретации требований действующей нормативной базы специалистами ТК25 (УкрНИИ ПБ, г. Киев) и их российскими коллегами в области пожарной безопасности. Приведены технически обоснованные предложения по корректировке нормативной базы с целью обеспечения пожарной безопасности ЭТИ, достоверности результатов сертификации ЭТИ по показателям безопасности, увеличения экспортного потенциала отечественных ЭТИ.

ВВЕДЕНИЕ

В [5] и в [6] рассмотрены актуальные вопросы, связанные с обеспечением пожарной безопасности электротехнических изделий (далее – ЭТИ) и с невозникновением пожара от ЭТИ в процессе их эксплуатации. Обе статьи редакцией журнала «Электротехника і електромеханіка» были направлены в технический комитет ТК25 «Пожарная безопасность и противопожарная техника» с приглашением к сотрудничеству в части реализации технических предложений, содержащихся в статьях. Факсимильная копия ответного письма ТК25 в редакцию журнала прилагается к настоящей статье. В рамках полемики с позицией специалистов ТК25 об обеспечении пожарной безопасности ЭТИ и в развитие тематики, охваченной публикациями [5], [6], необходимо сообщить следующее.

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМНЫХ ОБЪЕКТАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В письме ТК25 содержится утверждение о том, что рассмотренные в [5] ЭТИ являются комплектующими изделиями, которые устанавливаются в шкафах, и их пожарная безопасность может быть обеспечена групповой оболочкой – шкафом, а не индивидуальными оболочками ЭТИ. Следует указать, что в [5] в качестве примеров изделий, пожарная безопасность которых в настоящее время не может быть признана удовлетворительной, названы электромагнит управления переменного тока и муфта электромагнитная с контактным кольцом. Необходимо довести к сведению специалистов ТК25: указанные ЭТИ устанавливаются не в шкаф, а в технологическом оборудовании. Электромагнит управления, катушка которого при заклинивании якоря в ярме на номинальном ходе обтекается одиннадцатикратным номинальному пусковым током, должен быть укомплектован индивидуальным устройством токовой защиты (см. [5]). Это требование непосредственно следует из [2], п.3.1.10, в котором, в частности, указано: «Снижение пожарной опасности электротехнических изделий ... достигается:

- введением в конструкцию изделий ... элементов электротехнической защиты, снижающих вероятность возникновения пожара ...;
- применением средств и (или) элементов, предназначенных для автоматического отключения изделия в аварийном режиме работы (перегрузка, перегрев, короткое замыкание и др.)...».

Групповое устройство защиты (например, автоматический выключатель, защищающий группу ЭТИ,

в том числе, - электромагнит управления в технологическом оборудовании) не сработает, если загрузка оборудования будет неполной (например, согласно циклограмме работы этого оборудования). Это значит, что если будет включён только один электромагнит управления, а не группа ЭТИ, то значение тока включения электромагнита будет меньше уставки по току автоматического выключателя. В такой ситуации только индивидуальная защита по току способна прервать аварийный режим работы электромагнита. В производимых и эксплуатируемых электромагнитах не предусмотрена их комплектация индивидуальным устройством защиты по току.

В дополнении к приведенным аргументам в пользу пересмотра [3] необходимо сообщить следующее. В [3] отсутствует требование к проверке междувитковой изоляции для катушек электромагнитов переменного тока. При повреждении изоляции обмоточного провода на стадии производства катушек образуется короткозамкнутый виток, в котором наводится вторичный ток, - как в трансформаторе тока. В результате в короткозамкнутом витке выделяется тепло, разрушающее катушку, приводящее к лавинному образованию в ней новых короткозамкнутых витков. Явление это давно известно. Оптимальный вариант проверки междувитковой изоляции – использование повышенного (по отношению к номинальному) значения испытательного напряжения, прикладываемого к выводам катушки, при этом частота испытательного напряжения должна в несколько раз превышать номинальную частоту испытываемого электромагнита. С увеличением частоты возрастёт индуктивная составляющая сопротивления катушки, что ограничит испытательный ток до приемлемого значения. Если установившееся значение тока в катушке при испытании не будет увеличиваться, будет подтверждено отсутствие междувитковых замыканий в катушке. Указанную проверку следует рассматривать как составную часть испытаний электромагнитов переменного тока на пожарную безопасность.

По приведенным замечаниям необходимо корректировать [3], на основании этой корректировки следует пересмотреть комплектность поставок электромагнитов заказчику, внести необходимые изменения в эксплуатационную документацию на электромагниты.

Возникает вопрос: можно ли на соответствие ныне действующим нормативным документам подтверждать пожарную безопасность электромагнита переменного тока, электромагнитной муфты с кон-

тактным кольцом при их сертификации по показателям безопасности? Ведь в таком случае результат сертификации вырождается в самообман и в явный обман потребителем продукции. Налицо ситуация, которую необходимо срочно менять.

Упомянутая уже ссылка специалистов ТК25 на возможность защиты ЭТИ групповой оболочкой (шкафом) несмотря на наличие нормативного обоснования ([1], п.5.6.2) выглядит малоубедительно – ведь в случае возгорания в шкафу одного ЭТИ выгорит всё содержимое шкафа. Разве при такой конструкции шкафа будет обеспечена конкурентоспособность отечественной продукции на рынках промышленно развитых стран мира? Конечно же, нет!

Ниже предложены редакции пункта 5.6.2 [1] – ныне существующая и рекомендуемая взамен существующей. В настоящее время п. 5.6.2 [1] сформулирован следующим образом: «Аппараты и приборы, устанавливаемые в шкафах, могут иметь меньшую степень защиты оболочки, указанную в таблице 5.2 (в том числе IP00) при условии, что шкафы имеют степень защиты оболочки не ниже, чем указано в таблице 5.2 для данной пожароопасной зоны». Рекомендуемая взамен существующей редакция п.5.6.2 [1]: «Предпочтительным является наличие индивидуальной оболочки для потенциального источника возгорания в каждом электрическом аппарате или приборе согласно требованиям таблицы 5.2. При отсутствии технической возможности укомплектования шкафа электрическими аппаратами и приборами, соответствующими требованиям таблицы 5.2, не соответствующие нормативным требованиям по степени защиты аппараты и приборы должны быть установлены в защищенных отсеках шкафа. Степень защиты каждого такого отсека должна соответствовать требованиям таблицы 5.2». Указанное требование к конструкции шкафа гармонизировано с [9] и [10, 2.2.3, 2.3.3.1]. Предлагаемая редакция п.5.6.2 [1] на практике не должна повлечь существенного усложнения и удорожания конструкции шкафа, если корректировка будет подвергнута не только указанный пункт [1], но весь раздел 5 [1] с учётом обоснований и рекомендаций, содержащихся в [5]. В [5] приведены конкретные примеры конструкций ЭТИ со степенью защиты IP00 по ГОСТ 14255-69, обеспечивающие пожаробезопасность ЭТИ в установленных режимах эксплуатации (например, плавкий предохранитель). В [5] указано, что действующий нормативный документ [1] необоснованно ограничивает пожаробезопасность конструкций ЭТИ наличием оболочки со степенью защиты IP54 (IP44) и выше по ГОСТ 14255-69. Таким образом, переработка раздела 5 [1] с учётом содержания [5] не только технически обоснована, но и должна дать ощутимый экономический эффект за счёт минимизации удорожания конструкции шкафа при реализации предлагаемых в данной статье повышенных требований к обеспечению шкафом пожаробезопасности ЭТИ.

ОБ УПЛОТНЕНИИ ВВОДА ПРОВОДОВ В ОБОЛОЧКУ ЭТИ

В письме ТК25 под сомнение поставлена необходимость уплотнения ввода проводов в оболочку ЭТИ (см. [6]), сказано следующее: «Эти (статьи – автор) выводы не подтверждены экспериментальными исследованиями». Так ли это? В [2], п. 3.1.10, указано: «Снижение пожарной опасности электротехнических изделий ... достигается ограничением проникновения

горючих материалов (веществ) извне к пожароопасным узлам электротехнических изделий». Это требование, базирующееся на многочисленных экспериментах (в том числе на пожарах с жертвами среди людей), никаких дополнительных подтверждений (включая «экспериментальные исследования») не предполагает. Требование является обязательным, оно приведено в комплексе мер по обеспечению пожарной безопасности ЭТИ. Одним из вариантов конструкции, обеспечивающим непроникновение окислителя (кислорода воздуха) к потенциальным источникам возгорания в ЭТИ (например, к коммутирующим контакт - деталям, искрящим по условиям работы), является раздельный уплотнитель, установленный на вводе проводов в оболочку ЭТИ (см. [6]). Сформулированное в письме ТК25 утверждение: «Уплотнение ввода проводов в оболочку не является обязательным при максимально возможном использовании негорючих и трудногорючих веществ и материалов в ЭТИ» нельзя признать технически обоснованным, оно ошибочно и полностью противоречит [2], п.3.1.10. В качестве иллюстрации технической необоснованности приведенного тезиса ТК25 рассмотрим следующий пример. В контактном зажиме ЭТИ (выключатель путевого, степень защиты – IP54, трубный ввод проводов в оболочку – без установки раздельного уплотнения) возник режим плохого контакта (например, вследствие уменьшения контактного давления при воздействии на ЭТИ виброударных нагрузок во время эксплуатации). В результате большого тепловыделения в контактном зажиме (согласно [4], стр.31 – 32, таблица 6, выделяемая мощность в режиме плохого контакта – 36 Вт при номинальном тепловом токе 18А; при пересчёте на номинальный тепловой ток выключателя путевого 16А выделяемая мощность составит 32 Вт) практически неотвратимо зажигание изоляционного *горючего* материала изоляции проводов. Автоматическая защита (выключателем, предохранителем) при таком отказе ЭТИ не срабатывает. В этом случае единственная реальная возможность обеспечения нераспространения возгорания – его локализация в объёме оболочки ЭТИ с использованием раздельного уплотнения на вводе в ЭТИ. При установке в трубе раздельного уплотнения будет перекрыт доступ воздуха к очагу возгорания, вследствие чего горение изоляции проводов не будет поддерживаться и пламя погаснет. Приведенный пример согласуется с информацией НИИ противопожарной обороны МВД СССР, изложенной в [4], стр. 17, где указано: «Скорость изменения сопротивления контактного соединения (в режиме плохого контакта – автор) возрастает при ... пребывании в среде с повышенным содержанием кислорода...». Таким образом, с использованием раздельного уплотнения возможно обеспечение на практике требования, содержащегося в [2], пункт 3.7.4: «Винтовые контактные соединения не должны являться источником зажигания в режиме «плохого контакта».

Следствием режима плохого контакта при неуплотнённом вводе проводов в оболочку ЭТИ может быть короткое замыкание оголённых в результате выгорания изоляции проводов, то есть шунтирование накоротко электрической нагрузки ЭТИ (выключателя путевого) с последующим срабатыванием токовой защиты. Однако этим авария в электросистеме не ограничится. При отсутствии уплотнения ввода проводов в оболочку рассматриваемого нами выключателя путевого горение изоляции проводов не прекратит-

ся. Оно будет продолжаться внутри трубы (см. [6]). Стало быть, аварийный режим эксплуатации одного ЭТИ (выключателя путевого) станет причиной возникновения вторичных аварийных режимов эксплуатации в других ЭТИ электросистемы. И это всё при допущении о стопроцентно негорючей изоляции путевого выключателя!

Следует отметить, что при уплотнённом вводе проводов в оболочку ЭТИ режим плохого контакта с учётом кратковременности воспламенения изоляции проводов на контактных выводах и достаточно большого расстояния между выводами не повлечёт за собой короткое замыкание между проводами.

Необходимо также указать на рекомендации для введения в ПУЭ шестого издания, содержащиеся в [4], стр.37, где указано:

а) «Заделка (то есть уплотнение – *автор*) жил проводов и кабелей в местах соединения, ответвления и присоединения должна обеспечивать защиту от зажигания изоляции теплом, выделяемым в контактом соединении в режиме плохого контакта при сверхтоках максимальной кратности»;

б) «Степень защиты, указанная на оболочках контактных соединений и аппаратов, должна распространяться на вводы и сохраняться в условиях испытания на нагревание номинальным током в режиме плохого контакта».

Комментарии, пожалуй, излишни. Особо следует указать, что концепция обеспечения пожарной безопасности ЭТИ, изложенная в [2], пункты 3.1.10 и 3.7.4, предусматривает использование в сочетаниях различных технических средств – без вычленения какого-то одного из них в качестве единственного средства обеспечения пожарной безопасности ЭТИ. Приведенный выше пример с обеспечением пожарной безопасности выключателя путевого – конкретное тому подтверждение.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВИНТОВЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Есть необходимость ещё раз вернуться к требованию, сформулированному в [2], п. 3.7.4, и процитированному в предыдущем разделе настоящей статьи. Предлагается сформулировать требование следующим образом: «Контактное нажатие в винтовом контактом соединении в режимах эксплуатации, регламентированных техническими условиями и эксплуатационной документацией на электротехническое изделие, должно обеспечивать невозникновение режима плохого контакта в течение всего срока службы изделия». Если не возникнет режим плохого контакта, то и зажигания изоляции не будет. Весь вопрос в том, с использованием каких технических средств можно обеспечить стабильное значение контактного нажатия в винтовом контактом соединении? Предлагается расширить номенклатуру пружинных элементов, используемых в качестве средства стабилизации электрического сопротивления в винтовом контактом соединении. Наряду с указанной в [8], п.2.1.7, тарельчатой пружинной (см. Рис.1) рациональным представляется использование многолепестковой пружинной шайбы согласно [7] (см. Рис.2), для чего необходима корректировка [8].

Шайбы согласно рис.2 в течение многих лет используют в комплектации автомобилей (см. [7]), а ведь автомобили эксплуатируют в весьма жёстких условиях в части воздействия на элементы конструкции виброударных нагрузок.

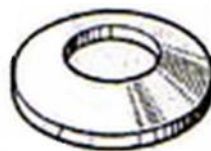


Рис.1



Рис.2

С учётом того, что изоляция проводов может загореться (пример возможного возгорания рассмотрен в предыдущем разделе), целесообразно рассмотреть следующее техническое решение, направленное на обеспечение невозгорания изоляции проводов: снятие изоляции на участке провода на расстоянии (30...50) мм от места его крепления в винтовом контактом зажиме ЭТИ и установка на этом участке провода набора керамических бус или изоляционной трубки из материала с высоким классом нагревостойкости. Это предложение может быть реализовано не во всех случаях, но оно имеет реальную область применения – например, для электромагнита управления переменного (постоянного) тока с жёсткими или гибкими выводами катушки, со степенью защиты IP00. При наличии жёстких выводов изоляция должна быть снята с подсоединяемых к ним монтажных проводов, при наличии гибких выводов изоляция должна быть снята с них. Другим примером реализации предложения может быть подсоединение проводов с использованием керамических бус (изоляционных трубок) к блоку наборных зажимов со степенью защиты IP00 по ГОСТ 14255-69. В приведенных примерах невозгорание изоляции проводов при ослаблении нажатия в винтовых контактных зажимах ЭТИ обеспечивается за счёт резкого снижения температуры токоведущего материала проводов при увеличении расстояния от источников выделения тепла – контактных зажимов ЭТИ – до линии соприкосновения керамических бус (изоляционных трубок) с изоляционным покрытием проводов.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа письма технического комитета ТК25 установлена техническая необоснованность позиции ТК25 о сохранении без изменений нормативной базы обеспечения пожарной безопасности ЭТИ.
2. Обоснована неэффективность с позиции обеспечения пожарной безопасности защиты ЭТИ несекционированным шкафом, в связи с чем предложена новая редакция пункта 5.6.2 [1], позволяющая минимизировать ущерб от возгорания ЭТИ в шкафу. Секционированный в соответствии с приведенными предложениями шкаф повысит конкурентоспособность на рынках промышленно развитых стран мира смонтированных в нём ЭТИ преимущественно отечественного производства при комплектной поставке промышленного оборудования (например, станка со шкафом управления к нему) зарубежным заказчиком.
3. В дополнение к [5] расширен перечень причин пожарной опасности электромагнита переменного тока. Подтверждена необходимость корректировки [3] по замечаниям и предложениям, содержащимся в [5] и в настоящей статье.
4. Предложено расширение номенклатуры средств стабилизации электрического сопротивления в винтовом контактом соединении с целью предотвращения возникновения в нём режима плохого контакта.
5. Предложена новая редакция пункта 3.7.4 [2]. Эта редакция более чётко, чем существующая, регламен-