



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славенні імена

- Баранов М.И.** Антологія виданих досягнень в науці і техніці. Частина 7: Створення ядерного і термоядерного озброєння **3**

Електричні машини та апарати

- Блинцов В.С., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А., Садовой А.С.** Трансформатори для встраювання в оболочку обмеженого діаметра об'єктів спеціальної техніки і постановка задачі їх удосконалення **16**
- Бранспиз Ю.А., Вельченко А.А.** Перевірка адекватності граничного умови на лінії зазору при розрахунок векторного потенціалу в обмоточному вікні плоскопаралельного електромагніта **22**
- Васьковський Ю.М., Чусько Р.М.** Математичне моделювання електромагнітного поля компенсованого асинхронного двигуна **26**
- Голенков Г.М., Аббасян М.** Дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі коаксіально-лінійного синхронного двигача з аксіальним і радіальним розташуванням постійних магнітів на якорі **30**
- Gurevich V.I.** Technological advance in relay protection: dangerous tendencies **33**
- Кондратенко И.П., Некрасов А.В., Волканин Е.Е.** Електротехнічна система з складними стержнями для високоградієнтної магнітної сепарації **38**
- Лущик В.Д.** Шестифазна обмотка асинхронних двигунів **42**
- Милых В.И., Полякова Н.В.** Сравнительный численно-полевой анализ гармонического состава ЭДС в турбогенераторах **45**
- Мороз В.І., Снітков І.Ф., Харчишин Б.М.** Інженерний метод врахування вихрових струмів у моделях електромеханічних систем **50**
- Чабан В.Й., Костючко С.М.** Математична модель насиченого трифазного конденсаторного асинхронного мотора **53**
- Шинкаренко В.Ф., Лысак В.В.** Генетическі програми структурної еволюції функціональних класів електромеханічних систем **56**

Техніка сильних електричних та магнітних полів

Баранов М.И. Лысенко О.В.	Экспериментальное исследование разрушения опытных образцов древесины сосны при прямом воздействии на них больших импульсных токов искусственной молнии	63
Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Трунова И.С.	Согласующее устройство «дискового» типа	69

Ювілеї

Бржезицький В.О.	До 70-річчя з дня народження	74
Васьковський Ю.М.	До 60-річчя з дня народження	75

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.

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. Електронна версія журналу представлена на сайті <http://nbuv.ton.gov.ua> в розділі «Інформаційні ресурси / Наукова періодика України» починаючи з 2009 року.

Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів відповідно до Вимог, які наведені на офіційному сайті НТУ «ХПІ» (<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 7: СОЗДАНИЕ ЯДЕРНОГО И ТЕРМОЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ**

Наведено короткий нарис з усесвітньої історії створення перших зразків ядерної і термоядерної зброї, що з'явилася як вершиною людського розуму, так і зловісною загрозою знищення людства.

Приведен краткий очерк из всемирной истории создания первых образцов ядерного и термоядерного оружия, явившегося как вершиной человеческого разума, так и зловещей угрозой уничтожения человечества.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с рассекречиванием ведущими ядерными державами мира многих своих архивных данных, касающихся разработки и создания первых образцов ядерного и термоядерного оружия, наличием обширных открытых публикаций и информационных сообщений в сети интернет по данной проблематике открывается возможность для более предметного и системного изложения достаточно сложных научно-технических вопросов этих грандиозных научно-промышленных эпопей в США, бывшем СССР и затем в ряде других развитых зарубежных стран мира. Сейчас принято эти крупномасштабные национальные научно-технические программы военного назначения называть Атомными проектами. Что касается Атомного проекта СССР, то согласно [1] в период 1998-2009 гг. на основании Указа Президента Российской Федерации (РФ) от 17.02.1995 г. №160 "О подготовке и издания официального сборника архивных документов по истории создания ядерного оружия в СССР" Минатомом РФ было издано в открытой печати три тома из 11 книг под общим названием "Атомный проект СССР. Документы и материалы" [2]. Большим вкладом в историю Атомного проекта СССР явились научно-технические труды Международного симпозиума, состоявшегося в 1996 году в Объединенном институте ядерных исследований РФ (г. Дубна), которые были изданы в открытой печати в трех томах в период 1997-2003 гг. [3], а также сборники документов Российского научного центра "Курчатовский институт", опубликованные в открытой печати в период 1995-1998 гг. в виде 16 брошюр [4]. В этой связи автор при изложении ряда материалов данного научно-исторического очерка будет главным образом опираться на указанные выше литисточники.

**1. ДОСТИЖЕНИЯ США В РАЗРАБОТКЕ
И СОЗДАНИИ ЯДЕРНОГО И ТЕРМОЯДЕРНОГО
ОРУЖИЯ**

1. Ядерное оружие США. В США активные работы по Манхэттенскому проекту были начаты с лета 1942 года после передачи его в ведение американской армии и назначения административным руководителем работ по созданию атомной бомбы бригадного генерала инженерных войск 46-летнего Лесли Гровса [5, 6]. С осени 1942 года США приступили к строительству заводов по промышленному производству оружейных изотопов урана ^{235}U (так в долине реки Теннесси возник г. Ок-Ридж) и плутония ^{239}Pu (благодаря чему на пустынном берегу реки Колумбия появился г. Хэнфорд). Первым

значительным шагом США в овладении внутриядерной энергии явилось создание впервые в мире в декабре 1942 года в г. Чикаго под руководством выдающегося итальянско-американского физика Энрико Ферми (1901–1954 гг.) действующего уран-графитового ядерного реактора на медленных нейтронах [5, 6]. Данный гетерогенный ядерный реактор (рис. 1), выполненный в форме эллипсоида из 57 радиальных слоев графитовых прямоугольных блоков особо высокой чистоты общим весом около 385 тонн, распределенных по его объему 40 тонн природного урана ^{238}U в виде малых брусков из окиси урана весом по 2 кг и размещенных в центральной части реактора (котла) 6 тонн металлического урана ^{238}U , имел высоту до 6,2 м и наибольшую ширину до 7,8 м [5, 6]. Управление процессом деления медленными нейтронами ядер изотопа урана ^{235}U , входящего в состав природного урана ^{238}U и составляющего в нем по массе до 0,71 %, в этом реакторе осуществлялось вручную при помощи стержней из кадмия ^{112}Cd , установленных на 3 уровнях в 5 каналах, радиально пронизывающих его активную зону и выходящих наружу с одной стороны (см. рис. 1) [5, 7].

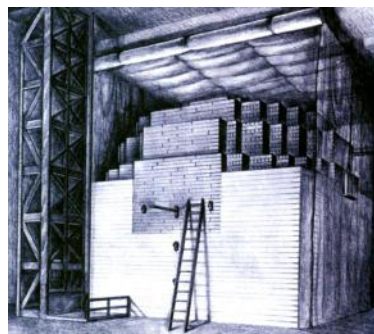


Рис. 1. Внешний вид первого в мире уран-графитового ядерного реактора Э. Ферми, построенного в США для изучения цепной ядерной реакции деления в уране ^{235}U [7]

В уран-графитовом ядерном реакторе Э. Ферми была впервые получена управляемая самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция в уране ^{235}U . Примечательна фраза, сказанная Э. Ферми своим коллегам сразу после проведенных им опытов на указанном реакторе [8]: "2 декабря 1942 года войдет в историю человечества как черный день". Американским физикам-ядерщикам стало ясно, что эта конструкция ядерного реактора может быть использована для получения оружейного изотопа плутония ^{239}Pu и что атомная бомба – не фантазия, а будущая реальность. Летом 1943 года для получения ядерных постоянных,

расчета критической массы, выбора способа подрыва, проектирования и изготовления ядерного боезаряда (на основе изотопов как урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, так и плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$) в США в рамках Уранового проекта в штате Нью-Мексико на пустынном плато вблизи реки Рио-Гранде на высоте около 2200 м была создана Лос-Аламосская научная лаборатория. Директором этого крупного закрытого учреждения, реализующего атомную программу США, по просьбе генерала Л. Гровса был назначен 39-летний физик-теоретик Роберт Оппенгеймер (1904-1967 гг.). Под руководством "отца" американских атомных урановой и плутониевой бомб Р. Оппенгеймера (рис. 2) для их подрыва и создания критических масс в используемых США ядерных материалах были выбраны методы соответственно "пушечного выстрела" одной части урана в другую и газодинамической "имплозии", основанный на "взрыве внутрь" распределенного по наружной сфере бомбы заряда из тринитротолуола [9], в центре которой размещались части плутониевого заряда [2, 8, 10].



Рис. 2. "Отец" первых американских ядерных плутониевой и урановой бомб Р. Оппенгеймер (справа) и выдающийся физик-теоретик 20-го столетия А. Эйнштейн (слева) [10]

Первым готовым к испытанию на полигоне американской авиабазы Аламогордо, расположенном в 450 км от Лос-Аламосской лаборатории, стало ядерное изделие (экспериментальная атомная бомба) под кодовым названием "Тринити" (в переводе с английского – "Троица"), имеющее длину 3,5 м и содержащее плутониевый боезаряд общей массой 5,4 кг (рис. 3) [8, 10]. Произошло это благодаря пуску осенью 1944 года первого промышленного реактора США в Хэнфорде для наработки оружейного плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ [10]. Снаружи этого ядерного боезаряда в "Тринити" размещалась обычная тротиловая взрывчатка общим весом около 2 тонн, подрываемая при помощи электродетонаторов с командного пункта [8, 10]. 16 июля 1945 года около 5 часов 30 минут утра первая американская атомная плутониевая бомба, размещенная на стальной вышке на высоте 30 м над землей, была успешно взорвана (рис. 4) [8, 10]. Сразу после срабатывания ядерного заряда над пустыней, по описанию очевидцев этого исторического события, "возник огромный огненный шар, к которому медленно и зловеще поднималось круглое облако из пыли и света, окруженное голубоватым кольцом и приобретающее белый, а затем красный цвет; огненный шар рос, увеличивался в диаметре до 1,5 км и поднимался в стратосферу; через несколько секунд огненный шар уступил место столбу клубящегося дыма, который стал

подниматься на высоту до 12 км и принимать форму гигантского гриба; затем задрожала земля и раздался страшный грохот" [8]. Этот грохот был первым "криком" новорожденного на Земле страшного ядерного века, а ядерный "гриб" стал впоследствии зловещим символом ядерных и термоядерных взрывов.



Рис. 3. Американское ядерное плутониевое изделие "Тринити" мощностью 18 кт, взорванное США 16 июля 1945 года в пустынном районе Аламогордо (штат Нью-Мексико) [7]

Один из творцов нового вида и невиданного землянами до сих пор по своей разрушительной мощи оружия – Р. Оппенгеймер был подавлен и ошеломлен этим страшным атомным взрывом в Аламогордо. Недаром он по прошествии многих лет в 1956 году об проделанной тогда перед этим взрывом титанической работе в Лос-Аламосской лаборатории скажет следующие слова [10]: "Мы сделали работу за дьявола".



Рис. 4. Ядерный "гриб" от первого в мире наземного взрыва ядерной плутониевой бомбы США мощностью 18 кт (изделие "Тринити", 16 июля 1945 года, штат Нью-Мексико) [7]

С другой стороны, Э. Ферми (рис. 5) сразу после взрыва атомной бомбы в Аламогордо воскликнул следующее [8]: "Не надоедайте мне с вашими терзаниями совести! В конце концов, это – превосходная физика!". Через несколько часов после срабатывания "Тринити" в эпицентр ядерного взрыва было послано три выложенных изнутри свинцовыми плитами (для дополнительной защиты людей от проникающей радиации) боевых танка "Шерман" с автономными для их экипажей источниками кислородного питания. В одном из этих танков находился Нобелевский лауреат по физике за 1938 год Э. Ферми, которому не терпелось самому увидеть страшные результаты своей работы. Его глазам предстала полностью выжженная огненным шаром взрыва земля, на которой в радиусе 1,5 км было уничтожено все живое [8]. В эпицентре взрыва песок пустыни спекся в стекловидную зеленоватую хрустящую под гусеницами танка сплошную корку [8, 10]. После физико-химического анализа проб этого искусственно полученного при атомном взрыве стекловидного мине-

рала, не существовавшего раньше на Земле, физики-ядерщики установили, что при данном взрыве высвободилась энергия, равная энергии химического взрыва 18 кг тринитротолуола [5, 8, 9].

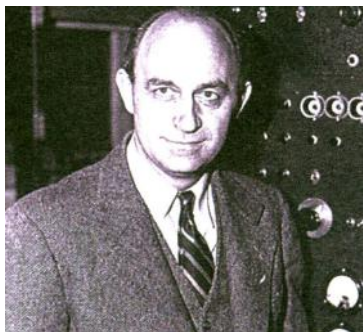


Рис. 5. Один из активных участников Манхэттенского проекта США, выдающийся физик-универсал Э. Ферми [5,6]

Следует заметить, что американцы взрыв своей первой атомной бомбы усиленно готовили к началу Потсдамской международной конференции с участием руководителей трех держав-победительниц – СССР, США и Великобритании, открывшейся 17 июля 1945 года в 17 часов в уцелевшем дворце Цецилиенхоф недалеко от разрушенного г. Берлина [5, 8]. Политического или иного давления на советскую делегацию во главе с И.В. Сталиным это ставшее им известное от Президента США Г. Трумэна и исключительное по значимости для начала мировой гонки вооружения массового уничтожения событие в тот момент не оказало. Внешняя разведка СССР держала И.В. Сталина, Л.П. Берия (административного руководителя с 1945 года Атомного проекта СССР) и академика СССР И.В. Курчатова (научного руководителя с 1942 года Атомного проекта СССР) в курсе всех известных ей событий по созданию в США атомного оружия [1-4]. Но в руках США после создания ядерного оружия появился "атомный козырь", бить которого СССР было пока нечем. С этого момента США с СССР стал разговаривать с позиции военной силы. Эта воинственная позиция США проявилась и при не оправданных ходом боевых действий на Дальнем Востоке с участием СССР в войне против Японии атомных бомбардировок в 1945 году мирных городов Хиросимы (6 августа) и Нагасаки (9 августа), унесших сотни тысяч ни в чем не повинных жизней. Над Хиросимой американцы взорвали сброшенную со стратегического бомбардировщика В-29 ядерную урановую бомбу "Литтл Бой" ("Малыш", рис. 6), а над Нагасаки – ядерную плутониевую бомбу "Фэт Мэн" ("Толстяк", рис. 7). Весь мир ужаснулся и оцепенел от этих варварских человеконенавистнических действий США.



Рис. 6. Первая американская ядерная урановая бомба "Литтл Бой" ("Малыш") мощностью около 13 кт (имела вес 4100 кг, длину 3 м, диаметр 0,7 м и содержала не менее 50 кг изотопа урана ^{235}U), взорванная 6 августа 1945 года на высоте около 600 м над г. Хиросима (Япония) [8, 11]



Рис. 7. Первая американская ядерная плутониевая бомба "Фэт Мэн" ("Толстяк") мощностью около 20 кт (имела вес 4500 кг, длину 3,25 м, диаметр 1,5 м и содержала не менее 5 кг изотопа плутония ^{239}Pu), взорванная 9 августа 1945 года на высоте около 600 м над г. Нагасаки (Япония) [8, 11]

На рис. 8 приведен внешний вид взметнувшегося в стратосферу на высоту до 13 км ядерного "гриба" от воздушного взрыва американской ядерной плутониевой бомбы "Толстяк", заснятого с бомбардировщика В-29, оснащенного фотоаппаратурой и сопровождавшего основной В-29 с этой бомбой (А- бомбой).

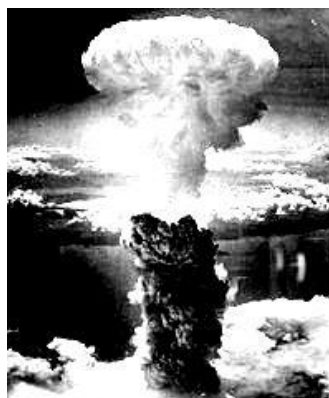


Рис. 8. Ядерный "гриб" от воздушного взрыва на высоте около 600 м над г. Нагасаки американской ядерной плутониевой бомбы "Толстяк" (9 августа 1945 года, Япония) [12]

Уже с 1943 года физики-ядерщики США (например, Э. Ферми и др.) стали подумывать о возможном создании более мощной чем ядерная бомба – термоядерной бомбе, запалом ("спичечной головкой") для которой может послужить ядерная или А- бомба [5, 6, 10]. Но так как ядерная бомба была пока в "металле" ими не изготовлена и не испытана, то работы по разработке более мощной водородной бомбы в то время в Лос-Аламосской лаборатории США велись вяло без конкретных сроков и при их незначительном финансировании. В дальнейшем в период маккартизма ("охоты на ведьм") в США это положение послужило одной из причин серьезных обвинений Р. Оппенгеймера в его нелояльности и даже саботаже работам по овладению США первыми в мире этим чудовищным по своему разрушительному действию оружием. На рис. 9 для сравнения с воздушным ядерным взрывом (см. рис. 8) приведен внешний вид подводного взрыва США в 1955 году своей маломощной атомной бомбы в акватории Тихого океана [13-18].

2. Термоядерное оружие США. Принципиальным отличием водородной бомбы (H- бомбы) от атомной или А- бомбы является отсутствие в термоядерной бомбе критической массы материала ее заряда, в котором происходит синтез легких ядер вещества (например, между ядрами изотопов водорода – дейтерия ^2H или трития ^3H или в их смеси) с выделением бóльшей в 4,2 раза удельной энергии, чем при делении тяжелых ядер (например, ядер изотопов урана ^{235}U или плуто-

ния ${}_{94}^{239}\text{Pu}$) [2, 10, 13]. Идею создания такой супербомбы с 1946 года активно продвигал американский физик-ядерщик Эдвард Теллер (1908-2003 гг.). К началу 1951 года сложные расчеты физиков-теоретиков США показали, что предложенная им схема H -бомбы ("Супер"), основанная на детонационном поджигании A -бомбой с одного края термоядерной взрывчатки из дейтерия ${}_1^2\text{H}$, размещенной в трубе из урана ${}_{92}^{238}\text{U}$, была неработоспособной [2, 13]. Весной 1951 года фанатично вынашиваемую Э. Теллером (рис. 10) идею H -бомбы спас работавший тогда в Лос-Аламосской лаборатории американский физик и математик Станислав Улам (1909-1984 гг.), родившийся в г. Львове и закончивший в 1933 году Львовский университет (Польша-Украина) [14]. В США С. Уламом (рис. 11) для реализации H -бомбы был предложен новый импlosionный метод "радиационного суперсжатия" термоядерной взрывчатки (например, дейтерия ${}_1^2\text{H}$ или трития ${}_1^3\text{H}$) перед ее поджиганием [13, 14]. Следует отметить, что исходная плотность жидкого дейтерия ${}_1^2\text{H}$ в пять раз меньше плотности обычной воды [13]. Только недавно стало известно, что в первых американских H -бомбах жидкий дейтерий ${}_1^2\text{H}$ доводили до плотности около 100 г/см^3 при давлении до 10^{12} атмосфер, предположительно возникающем в самом центре Солнца [13, 15].



Рис. 9. Подводный взрыв в 1955 г. американской ядерной бомбы мощностью 10 кт в акватории Тихого океана [18]



Рис. 10. Выдающийся физик-ядерщик США, один из "отцов" первой американской H -бомбы Э. Теллер [14]

Здесь для читателя необходимо указать то, что при взрыве ядерной плутониевой бомбы около 80 % энергии выделяется в виде мягкого рентгеновского излучения и около 20 % энергии выделяется в виде кинетической энергии разлетающихся осколков деле-

ния ядерного горючего [13, 15]. Скорость рентгеновских лучей от взрыва A -бомбы на несколько порядков больше скорости расширяющихся осколков деления плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, достигающей до 10^6 м/с [13, 15].



Рис. 11. Выдающийся физик-теоретик США С. Улам, один из "отцов" первой американской термоядерной бомбы [14]

В этой связи метод радиационный импlosionи С. Улама позволял существенно сжать контейнер с термоядерным горючим до начала его интенсивного нагрева продуктами ядерного взрыва A -бомбы. Модель американской водородной бомбы, основанная на радиационном методе суперсжатия ее термоядерной взрывчатки, получила название двухступенчатой схемы Улама-Теллера (первая ступень – "затравочный" ядерный плутониевый заряд, предназначенный для создания сверхвысоких температур и давлений в разжигаемом термоядерном горючем H -бомбы; вторая ступень – контейнер с термоядерным горючим H -бомбы, массивные стенки которого выполнены из изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$, предохраняющего его горючее от преждевременного интенсивного разогрева, способствующего эффективному суперсжатию этого термоядерного горючего и делящегося под действием быстрых нейтронов от реакции синтеза используемых в составе термоядерной взрывчатки изотопов водорода с дополнительным выделением огромных значений энергии) [13, 15]. Поэтому при указанных выше теплофизических условиях (температурах в сотни миллионов градусов и давлениях в сотни миллиардов атмосфер) в термоядерной взрывчатке (например, в жидком дейтерии ${}_1^2\text{H}$) могла проходить термоядерная реакция синтеза ее легких ядер такого вида [2, 13, 15]:

$${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} = {}_2^3\text{He} + {}_0^1n + 3,27 \text{ МэВ.} \quad (1)$$

В результате термоядерной реакции (1) при синтезе двух ядер дейтерия ${}_1^2\text{H}$ возникал легкий изотоп гелия ${}_2^3\text{He}$, один быстрый нейтрон ${}_0^1n$ и выделялась энергия около 3,27 МэВ [13, 15]. При данных температурах и давлениях в термоядерном горючем оказывалась возможной и другая более эффективная для H -бомбы термоядерная реакция синтеза легких ядер изотопов водорода – дейтерия ${}_1^2\text{H}$ и трития ${}_1^3\text{H}$, сопровождающаяся для этих двух ядер образованием тяжелого изотопа гелия с массовым числом четыре – ${}_2^4\text{He}$ и выделением больших по сравнению с приведенной выше реакцией (1) значений энергии [2, 13, 15]:

$${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} = {}_2^4\text{He} + {}_0^1n + 17,6 \text{ МэВ.} \quad (2)$$

США 1 ноября 1952 года на атолле Эниветок под кодовым названием "Иви Майк" было проведено пер-

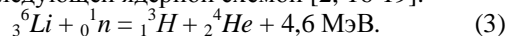
вое в мире испытание термоядерного устройства, выполненного по двухступенчатой схеме Улама-Теллера [13, 16]. Мощность взрыва (рис. 12) этого крупногабаритного изделия (масса – 74 т; высота – 8 м; диаметр – 2 м) составила 10,4 Мт (2,4 Мт – от синтеза изотопов водорода и 8 Мт – от деления урана ${}_{92}^{238}\text{U}$), что примерно в 500 раз превысило мощность плутониевой А-бомбы, сброшенной 9 августа 1945 года на японский город Нагасаки [1, 8, 16]. В качестве термоядерного горючего в этом изделии была применена охлажденная до криогенной температуры жидкая смесь дейтерия ${}^2\text{H}$ и трития ${}^3\text{H}$ массой 100 кг, размещенная в контейнере из изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ массой 4,5 т [16]. Так как эта жидкая смесь изотопов водорода не имела практического применения для термоядерных боеприпасов, то США 1 марта 1954 года на атолле Бикини в ходе испытаний серии "Castle Bravo" проверили концепцию использования в H-бомбе твердого термоядерного горючего – дейтерида лития-6 [16]. При этом в термоядерном изделии под кодовым названием "Креветка" в качестве боезаряда была применена твердая смесь из 40 % дейтерида лития-6 и 60 % дейтерида лития-7 [16]. При его расчётной мощности в 6 Мт реальная мощность взрыва термоядерного изделия "Креветка" составила 15 Мт, из которых 10 Мт выделилось при ядерном делении его оболочки из изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ и 5 Мт от реакции синтеза изотопов водорода [15-18]. Кстати, данное испытание опытной H-бомбы стало самым мощным термоядерным взрывом из когда-либо произведённых США.



Рис. 12. Наземный взрыв в 1952 году американского термоядерного устройства "Иви Майк" мощностью 10,4 Мт на атолле Эниветок, расположенном в Тихом океане [16, 18]

Вес термоядерного устройства США "Креветка" составлял 10,5 т при его длине 4,5 м и диаметре 1,35 м [16, 17]. Кратер от его взрыва получился диаметром 2 км при его глубине около 75 м [16-18]. Причина неожиданно высокой мощности этого взрыва была связана с "незапланированной" ядерной реакцией в ядрах атомов лития-7, дополнительно поставляющей в активную зону термоядерного взрыва тритий ${}^3\text{H}$. Необходимо отметить, что дейтерид лития-6 является твердым веществом и представляет собой соединение тяжелого изотопа водорода – дейтерия ${}^2\text{H}$, который в нормальных условиях находится в газообразном состоянии, и изотопа лития ${}^6\text{Li}$ с массовым числом шесть, составляющего до 7,4 % по массе в природном изотопе лития ${}^7\text{Li}$ с массовым числом 7 [16-19]. Дейтерид лития-6 позволяет хранить в себе дейтерий ${}^2\text{H}$

даже при плюсовых температурах окружающей его среды. Изотоп лития ${}^6\text{Li}$ является единственным в мире промышленным источником самого дефицитного тяжелого изотопа водорода – трития ${}^3\text{H}$ [19]. Ядро лития ${}^6\text{Li}$, поглощая при ядерном взрыве изотопа плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ("затравочная" А-бомба в составе H-бомбы) один медленный нейтрон ${}_0^1n$, распадается на ядро трития ${}^3\text{H}$ и ядро гелия ${}^4\text{He}$ с массовым числом 4 с выделением значительной энергии в соответствии со следующей ядерной схемой [2, 16-19]:



Из (1)–(3) видно, что при вышеуказанной ядерной реакции выделяется больше энергии, чем при слиянии (реакции синтеза) двух ядер дейтерия ${}^2\text{H}$, но меньше, чем при слиянии (реакции синтеза) ядер дейтерия ${}^2\text{H}$ и трития ${}^3\text{H}$. Образующийся при ядерной реакции (3) тритий ${}^3\text{H}$ вступает, в свою очередь, в термоядерную реакцию синтеза с дейтерием ${}^2\text{H}$, что существенно увеличивает выходную мощность основной H-бомбы [2, 16-19]. Далее развитие термоядерного оружия по схеме Улама-Теллера в США было направлено на его миниатюризацию с целью оснащения им межконтинентальных баллистических ракет и баллистических ракет подводных лодок [16-19]. К 1960 году в США на вооружение были приняты термоядерные боеголовки серии W47 мегатонного класса (масса 320 кг; диаметр 0,5 м), развернутые на подлодках с баллистическими ракетами "Поларис" [16-19]. На рис. 13 показан момент запуска с американской атомной подлодки, находящейся в подводном положении, баллистической ракеты "Трайидент-П" с разделяющимися восемью термоядерными боеголовками более поздней серии W88 [16-19].



Рис. 13. Запуск с американской атомной подлодки из подводного положения баллистической ракеты "Трайидент-П", оснащенной термоядерными боеголовками серии W88 [17]

2. ДОСТИЖЕНИЯ СССР В РАЗРАБОТКЕ И СОЗДАНИИ ЯДЕРНОГО И ТЕРМОЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

1. Ядерное оружие СССР. С появлением в июле 1945 года у США атомного оружия огромный комплекс работ по Атомному проекту СССР, стартовавшему распоряжением Госкомобороны СССР от 28 сентября 1942 года, был резко ускорен [1-4]. В сильно разрушенной и обескровленной Второй мировой войной в период 1941-1945 гг. небогатой советской стране правительство в ущерб материальному положению своих граждан ничего не жалело для незамедлительного

создания в противовес США собственного ядерного оружия. Современная история и открывшиеся сейчас многие архивные данные по Атомным проектам в США и СССР свидетельствуют о правильности принятых тогда руководством СССР и советскими физиками-ядерщиками основных стратегических научно-технических решений по быстрой разработке и созданию в СССР А-бомбы [1-4, 20, 21]. В результате оперативной реорганизации структуры управления предстоящими крупномасштабными работами по атомной программе СССР (создание атомной промышленности по переработке, обогащению и получению значительных количеств оружейных изотопов плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ и урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ее сырьевой базы (открытие новых урановых месторождений и рудников); создание мощной сети научно-исследовательских организаций по комплексному изучению данных радиоактивных материалов и получению необходимых ядерных констант для дальнейшей разработки и создания нового вида вооружения – ядерного оружия; создание закрытых и огромных по территории полигонов с широкой инфраструктурой для натуральных испытаний ядерного оружия; создание новых технологий по производству многих материалов (например, графита и ряда редких металлов) особой "ядерной" чистоты и др.) 20 августа 1945 года был организован Спецкомитет при правительстве СССР (председатель – маршал госбезопасности Л.П. Берия), в состав которого вошли следующие основные творцы истории советского атомного проекта: два физика – академики АН СССР И.В. Курчатов (научный руководитель всех работ по Атомному проекту СССР, рис. 14) и П.Л. Капица (вышел из состава в декабре 1945 года по личной просьбе и не внес в этот проект ничего важного [22]), генерал-полковник Б.Л. Ванников (начальник Первого главного управления (ПГУ) с функциями наркомата атомной промышленности – прообраза будущего Минсредмаша СССР) и генерал-полковник А.П. Завенягин (зам. начальника этого ПГУ по строительству) [1-4, 22, 23].



Рис. 14. Выдающийся российский физик-ядерщик, научный руководитель Атомного проекта СССР, академик АН СССР Игорь Васильевич Курчатов (1903-1960 гг.) [14]

В апреле 1946 года вблизи Саровской обители (Горьковская обл. РФ) было создано специальное КБ-11, именовавшееся "Арзамас-16" и явившееся первым советским ядерным центром (ныне РФЯЦ – Всерос-

сийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров), в котором проектировалась и изготавливалась первая советская ядерная бомба [1-4, 23]. Многие десятилетия несменным научным руководителем и главным конструктором КБ-11 (затем ВНИИЭФ) был выдающийся физик-ядерщик, академик АН СССР Юлий Борисович Харитон (рис. 15) [14, 20, 24]. Председатель правительства СССР И.В. Сталин предоставил беспрецедентное право финансирования всех работ по линии ПГУ по фактическим затратам без заранее предоставляемых и утвержденных смет. Для его получения требовалось лишь распоряжение и подпись одного из руководителей новой для СССР атомной отрасли его народного хозяйства: Б.Л. Ванникова, А.П. Завенягина, И.В. Курчатова, Ю.Б. Харитона [1-4]. Вот в таких благоприятных для физиков-ядерщиков финансово-экономических условиях в декабре 1946 года И.В. Курчатов совместно с сотрудниками лаборатории №2 АН СССР (ныне РНЦ "Курчатовский институт") осуществил запуск первого советского уран-графитового реактора для исследовательских целей [1-4, 14]. В июле 1948 года на Южном Урале (г. Озерск) под руководством И.В. Курчатова на Комбинате №817 (ныне широко известное в РФ и мире предприятие "Маяк") был пущен первый советский промышленный уран-графитовый реактор для наработки изотопа оружейного плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ [1-4, 23].



Рис. 15. Выдающийся российский физик-ядерщик, "отец" первых советских ядерных плутониевой и урановой бомб, академик АН СССР Юлий Борисович Харитон (1904-1996 гг.) [14]

К лету 1949 года с помощью данного ядерного реактора в СССР было получено минимально необходимое количество делящегося медленными нейтронами плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ (массой до 10 кг) для изготовления в КБ-11 ядерного боезаряда первой советской атомной плутониевой бомбы РДС-1 мощностью 22 кт тротилового эквивалента [1-4, 23]. 29 августа 1949 года на Семипалатинском ядерном полигоне (Южный Казахстан) было успешно проведено испытание первой советской ядерной бомбы РДС-1 с плутониевым зарядом (рис. 16) [1-4, 20, 22, 25]. Неимоверными усилиями промышленного потенциала СССР, советских ученых и разведчиков (прежде всего, преданного друга СССР, английского физика-теоретика Клауса Фук-

са, принимавшего непосредственное участие в американском Урановом проекте по созданию А-бомбы [1]) ядерной монополии США был положен конец. В настоящее время считается, что полученные внешней разведкой СССР данные по Манхэттенскому атомному проекту (разведцентру СССР из-за рубежа нашими друзьями и разведчиками-нелегалами было передано около 12000 листов подробной информации по конструкции американской А-бомбы, включая рабочие чертежи ее различных устройств, подробные сведения по свойствам применяемых в ней радиоактивных материалов, описания ядерных технологий получения изотопов плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ и урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ и многое др.) ускорили работы по Атомному проекту СССР в части создания А-бомбы примерно на два года [1, 21].

Экономия СССР денежных средств от этой информации могла выражаться тогда в сумме нескольких сотен миллионов долларов (сейчас она бы составила десятки миллиардов долларов) [1, 23]. Важно подчеркнуть то, что тогда сокращение любым путем времени на создание СССР атомной бомбы действительно было решающим фактором для обеспечения его собственной безопасности от возможного применения находящейся в руках оголтелых военных "ястребов" США ядерной "дубинки" (реально в Пентагоне в период 50-х годов 20-го столетия существовал не один подробный план развертывания атомной войны против СССР [1, 8, 23]). Поэтому и по прошествии более чем 65 лет с момента начала в СССР предельно форсированной военно-промышленной эпопеи по разработке собственного ядерного оружия объективно правильным является принятое И.В. Сталиным, Л.П. Берия и И.В. Курчатковым совместное решение о следовании при создании первой советской атомной бомбы в основном уже апробированным американским путем [1-4, 23]. При этом нам не следует думать, что советские физики-ядерщики в то напряженное со всех сторон время мало что знали в рассматриваемой сложной области ядерной физики и что они лишь слепо копировали американские ядерные результаты и разработки. Все ставшие известными СССР закрытые научно-технические данные США по их ядерной программе и связанной с ней А-бомбе советскими учеными перепроверялись во избежание ошибок или применения преднамеренной дезинформации [1, 23]. Ядерные константы для радиоактивных материалов А-бомбы экспериментально измерялись на собственных ядерных установках, основные конструктивные решения А-бомбы рассчитывались и многократно испытывались на физико-технических стендах СССР.



Рис. 16. Первая советская атомная бомба РДС-1 с ядерным плутониевым зарядом мощностью 22 кт [2, 25]

В то время любимой поговоркой главного конструктора первых советских атомных бомб Ю.Б. Харитона был следующий немецкий афоризм [1, 24]: "Один раз – значит ни разу, один опыт – значит ни одного". К этому необходимо добавить то, что к началу Второй мировой войны в СССР в области фундаментальной и прикладной ядерной физики были значительные достижения. Так, в г. Харькове в Украинском физико-техническом институте (УФТИ) АН УССР (ныне Национальный научный центр (ННЦ) "Харьковский физико-технический институт" ("ХФТИ") НАН Украины) 10 октября 1932 года группе советских физиков (К.Д. Синельников, А.К. Вальтер, А.И. Лейпунский, Г.Д. Латышев) первыми в СССР и вторыми в мире (после соответствующих ядерных опытов в апреле 1932 года английских физиков Дж. Кокрофта и Э. Уолтона, ставших из-за них лауреатами Нобелевской премии по физике за 1951 год [14]) удалось расщепить ядро природного изотопа лития ${}_{3}^7\text{Li}$ искусственно ускоренными в электростатическом генераторе-ускорителе Ван де Граафа протонами до энергии не более 2,5 МэВ (об этом событии УФТИ рапортовал самому И.В. Сталину, газета "Правда" от 22 октября 1932 года) [1, 5]. В период 1939-1941 годов советскими физиками-теоретиками и будущими известными академиками АН СССР из Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ) Ю.Б. Харитоном и Я.Б. Зельдовичем [9, 14] были выполнены три ключевые теоретические работы по ядерным процессам в делящемся изотопе урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ [1, 2, 14]. В этих работах они показали, что медленный (тепловой) нейтрон ${}_{0}^1n$, имеющий энергию около 0,025 эВ, с высокой вероятностью делит ядро изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ на два меньших ядра химических элементов (на два осколка из ядер бария ${}_{56}^{142}\text{Ba}$ и криптона ${}_{36}^{91}\text{Kr}$ [2, 7, 14]) с выделением в процессе одного акта деления от одного до трех тепловых нейтронов ${}_{0}^1n$ (в настоящее время известно, что при каждом акте деления ядра изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ высвобождается в среднем 2,47 теплового нейтрона ${}_{0}^1n$ [5, 26]). Эти нейтроны далее инициируют цепную ядерную реакцию деления ядер изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ по упрощенной схеме, приведенной на рис. 17. Ядро изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$, захватив медленный нейтрон ${}_{0}^1n$, после цепочки распадов за 2,3 дня переходит в ядро стабильного изотопа плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ [2, 7, 26].

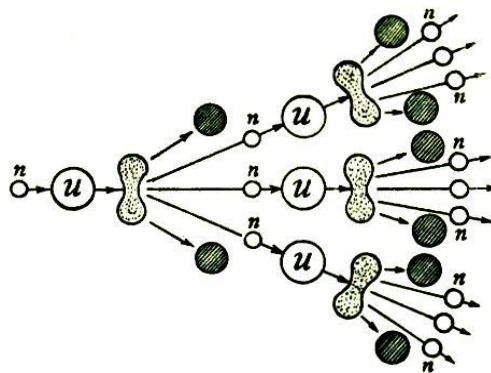


Рис. 17. Упрощенная схема цепной ядерной реакции деления в редком изотопе урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ (символ U) под действием медленных (тепловых) нейтронов ${}_{0}^1n$ (символ n) [14, 26]

Вот почему построив ядерный реактор с использованием природного изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ и медленных (тепловых) нейтронов, получаемых от ядерной реакции деления входящего в его состав по массе не более 0,71 % изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ вначале с энергией до 0,7 МэВ и затем замедляемых до энергии около 0,025 эВ в веществе-замедлителе, имеющем малое сечение захвата нейтронов (например, в воде или графите), можно с его (этого реактора) помощью нарабатывать выделенный в 1941 году группой американцев (Г. Сиборг, Э. Сегре, Дж. Кеннеди, А. Валь) изотоп плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ [14, 26]. Возвращаясь снова к цепной ядерной реакции деления в изотопе урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, следует отметить, что в каждом акте деления ядра изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ высвобождается энергия связи нейтронов в урановом ядре, равная около 197 МэВ, которая приходится на кинетическую энергию разлетающихся осколков деления (165 МэВ), нейтронов (5 МэВ), γ -излучения деления материнского ядра (5 МэВ), β - и γ -излучения осколков деления – дочерних ядер (11 МэВ) и нейтрино ν_e (11 МэВ) [1, 2, 26]. Ими (указанными учеными ЛФТИ) в те далекие от нас годы было показано, что цепная ядерная реакция деления не может идти в природном изотопе урана ${}_{92}^{238}\text{U}$, содержащем лишь до 0,71 % изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ в общей массе природного урана. Причиной тому является то, что ядра изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ не делятся в виде цепной ядерной реакции медленными (тепловыми) нейтронами ${}_0^1n$ из-за их недостаточной для этого процесса энергии. Ранее в разделе 1 нами было указано, что в ядрах изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ цепная ядерная реакция деления возможна лишь в случае захвата ими быстрых нейтронов, имеющих энергию порядка 10 МэВ и появляющихся при протекании термоядерных реакций синтеза в тяжелых изотопах водорода (например, реакций вида (1) и (2)) [2, 26]. В указанный временной период этими учеными ЛФТИ было введено понятие критической массы изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ и был дан ее расчет [2, 14]. На основании расчета цепной ядерной реакции деления медленными нейтронами ядер изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ еще тогда Ю.Б. Харитон и Я.Б. Зельдович установили, что для ее неуправляемого взрывного протекания и получения в результате ядерного взрыва в активной зоне указанного урана необходимо [1, 2]: во-первых, чтобы содержание делящегося медленными нейтронами ${}_0^1n$ изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ в ядерной взрывчатке было не менее 90 %; во-вторых, чтобы масса ядерной взрывчатки превышала некоторое критическое значение (порядка десятка килограмм); в-третьих, чтобы эта надкритическая масса ядерной взрывчатки удерживалась не менее 0,5 мкс в сжатом состоянии для протекания в ней не менее 70-80 цепных звеньев ядерного деления. Кроме того, советскими физиками Г.Н. Флеровым и К.А. Петржаком в 1940 году было открыто спонтанное деление ядер природного урана [14]. Все это может указывать на то, что в предвоенный период 40-х годов советская ядерная физика находилась на уровне лучших научных ядерно-физических лабораторий развитых стран мира. При этом отметим и то, что в 40-х годах прошлого столетия на заре ядерного века советскими физиками было установлено, что характеристическое время $t_{\text{яв}}$ ядерного взрыва в обычной атомной бомбе составляет порядка 500 нс [1, 2, 14, 15].

Данное время $t_{\text{яв}}$ определяется числом звеньев $n_{\text{яв}}$ цепной ядерной реакции деления в ядерной взрывчатке (обычно в ядрах изотопов урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ или плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ [2, 10, 23]), при котором (числе $n_{\text{яв}}$) лавинно нарастающее выделение энергии разрывает на супермелкие части материалы А–бомбы. Как правило, величина $n_{\text{яв}}$ численно составляет не более 80 [1, 22, 23]. Заметим, что с осени 1946 года к работам по атомной проблематике был привлечен зав. теоротделом Института физических проблем (ИФП) АН СССР и выдающийся физик-теоретик Лев Давидович Ландау (1908-1968 гг.) [5, 27]. Это удалось сделать И.В. Курчатову только после увольнения с поста директора ИФП П.Л. Капицы [22]. Перед Л.Д. Ландау и его группой физиков-теоретиков была поставлена важнейшая задача для создания советской А–бомбы – расчет процесса энерговыделения в атомной бомбе и получение формулы для коэффициента выгорания в ней ядерной взрывчатки (иначе говоря, для своеобразного КПД А–бомбы) [22]. Данная группа советских ученых менее чем за год справилась с поставленной перед ними сложной задачей [14, 22]. Недавно академик РАН И.М. Халатников в связи с этим важным моментом сказал [22, 28]: *"Я могу категорически утверждать: сделанное Ландау было в Советском Союзе не под силу больше никому"*. Применение с самого начала форсированных работ по А–бомбе советскими физиками-ядерщиками указанного выше положения и метода "газодинамической имплозии", базирующейся на "направленном внутрь взрыве" обычных химических взрывчатых веществ (например, тринитротолуола [9]), равномерно секционно расположенных снаружи центральной сферической области ядерного боезаряда (докритических урановых или плутониевых частей заряда) и синхронно подрываемых при помощи множества равноудаленных от этого заряда мощных электродетонаторов, позволило за счет колоссального сжатия давлением в сотни тысяч атмосфер ядерной взрывчатки и резкого увеличения плотности ее металла обеспечить переход частей заряда А–бомбы с докритической массой в критическое состояние и вызвать в нем (этом ядерном заряде) протекание взрывной цепной ядерной реакции распада (деления) атомных ядер урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ или плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ [2, 13, 15]. Подчеркнем здесь то, что в этом случае указанный переход ядерного заряда А–бомбы в критическое состояние достигался не наращиванием в нем массы изотопов урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ или плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, а увеличением плотности его ядерного материала за счет указанной имплозии. Согласно [13, 15] в первых А–бомбах размеры докритических частей ядерного заряда за счет применения метода "газодинамической имплозии" уменьшались до двух раз. Причем, в первых советских ядерных плутониевых и урановых бомбах в ядерную цепную реакцию деления вовлекалось всего до 10 % массы изотопов плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ или урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, а остальная ее часть – испарялась и разлеталась во все стороны от центра взрыва [13, 15]. Необходимо указать то, что СССР официально не признавал практически в течение месяца проведенного им 29 августа 1949 года испытания своей первой ядерной плутониевой бомбы РДС-1 [22]. Сообщение ТАСС об этом атомном испытании в СССР появилось только 25 сентября 1949 года

в газете "Правда" [22]. Связано это было с тем, что в то сложное и напряженное военно-политическое время СССР запасными атомными бомбами не обладал. Две следующие атомные бомбы в СССР должны были быть спешно сделаны только к декабрю 1949 года [22]. В то же время планы США по проведению атомных бомбардировок мирных городов и стратегических объектов СССР постоянно уточнялись, начиная с 1946 года [22, 23]. В этой связи народы бывшего СССР и все остальное прогрессивное человечество, по мнению автора, должны быть вечно благодарны отвечающему за нанесение по СССР превентивного ядерного удара тогдашнему Президенту США Г. Трумэну и его помощникам за непринятие ими тогда такого катастрофического для нас решения.

2. Термоядерное оружие СССР. Выдающимся российским физиком-теоретиком Яковом Борисовичем Зельдовичем (1914-1987 гг.) [9, 14] в 1950 году расчетом было установлено, что в слое тяжелого изотопа водорода – дейтерия ${}^2_1\text{H}$, нагретом до $10\cdot 10^9$ градусов, термоядерная реакция в нем заканчивается за характерное время $t_{\text{тяв}}$, составляющее до 30 нс [2, 21, 29, 30]. Сравнивая это время $t_{\text{тяв}}$ с временем $t_{\text{яв}}$, характерном для ядерной реакции и приведенном выше, можно заключить, что время указанного термоядерного синтеза примерно в 20 раз меньше времени "жизни" ядерной бомбы. Процесс разрушения металлической оболочки термоядерной бомбы определяется скоростью деформации ее материала и соответственно скоростью звука в нем. Скорость фотонных процессов и разлета осколков при взрыве А-бомбы на много порядков больше скорости звука в ядерных материалах атомной и термоядерной бомб [2, 29, 30]. Поэтому взрыв ядерной бомбы может излучательным и газодинамическим путем разогреть (поджечь) сильно сжимаемую дейтерий-тритиевую смесь пока еще не разрушенной им (ядерным взрывом) термоядерной бомбы [2, 22, 29, 30]. Более точные физические сведения подобного рода дали основание советским физикам-ядерщикам в 1950 году считать, что А-бомба может служить надежным термодинамическим запалом с температурой до 10^9 градусов для H-бомбы в единицы и десятки Мт [2, 21, 29, 30]. Сохраняя хронологию событий по истории создания в СССР первых образцов термоядерного оружия, отметим, что ранее в декабре 1945 года на заседании Техсовета указанного Спецкомитета СССР Я.Б. Зельдовичем был представлен доклад "О возможности возбуждения реакций в легких ядрах" (соавторы – И.И. Гуревич, И.Я. Померанчук, Ю.Б. Харитон) [1]. Однако, команды "сверху" (со стороны И.В. Сталина и Л.П. Берия) на дальнейшую разработку этих термоядерных идей не последовало. Эти административные руководители работ по Атомному проекту СССР не без основания жестко придерживались тогда единственно возможного для СССР ядерного направления работ – скорейшего создания на основе ядерной реакции деления советской атомной бомбы по американской схеме [1, 2]. Тем не менее, в июне 1948 года специальным Постановлением правительства СССР в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) была организована отдельная научная группа

(руководитель – зав. теоретическим отделом ФИАН, академик АН СССР, известный физик-теоретик (будущий лауреат Нобелевской премии по физике за открытие и объяснение эффекта Вавилова-Черенкова, 1958 год [14]) И.Е. Тамм (1895-1971 гг.)), в состав которой был включен молодой и тогда пока никому не известный к.ф.-м.н., ставший в скором будущем д.ф.-м.н. и академиком АН СССР, физик-теоретик А.Д. Сахаров (рис. 18) [1, 2]. Кроме того, в данную группу были включены и другие физики-теоретики ФИАН: С.З. Беленький, В.Л. Гинзбург (будущий лауреат Нобелевской премии по физике за исследования в области сверхпроводимости, 2003 год [14]) и Ю.А. Романов [1, 29, 30]. Первоначально в задачу этой небольшой группы входила проверка расчетов физиков-теоретиков из Института химической физики (ИХФ) АН СССР А.С. Компанейца и С.П. Дьякова, проводимых в ИХФ под научным руководством Я.Б. Зельдовича и касающихся возможности протекания термоядерной реакции в одноступенчатой схеме построения H-бомбы, напоминающей схему водородной бомбы Э. Теллера "Супер" [1, 2, 13].



Рис. 18. Выдающийся российский физик-ядерщик, "отец" первой советской термоядерной бомбы, академик АН СССР Андрей Дмитриевич Сахаров (1921-1989 гг.) [14]

Вслед за указанным выше Постановлением СМ СССР последовало другое от 10 июня 1948 года "О дополнении плана работ КБ-11", в котором советскому ядерному центру предписывалось проведение специальных работ по проверке возможности создания H-бомбы [1, 2]. Такой возможной советской H-бомбе этим решением было присвоено кодовое наименование РДС-6 [1, 2, 29, 30]. Так как схема одноступенчатой H-бомбы, прорабатываемая группой Я.Б. Зельдовича в ИХФ АН СССР, предусматривала использование плутониевой А-бомбы и трубы из изотопа урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ с размещенной внутри нее термоядерной взрывчаткой (изотопа водорода – дейтерия ${}^2_1\text{H}$), поджигаемой с торца трубы А-бомбой с последующей детонацией этой взрывчатки вдоль нее (трубы), то в СССР такая возможная схема H-бомбы получила кодовое название РДС-6т ("Труба") [1, 2, 13, 30]. Следует отметить то, что с учетом открытия в наше время ряда архивных материалов Атомных проектов США и СССР выясняется следующая картина результатов термоядерных исследований по обе стороны Тихого океана по возможности создания H-бомбы на основе схемы "Труба": физики-ядерщики США и СССР ряд лет бесплодно бились над ее практической реализацией. К концу

1952 года ведущие американские и чуть позже советские физики-теоретики пришли к выводу об отрицательном балансе энергии в указанной одноступенчатой схеме H -бомбы "Труба": потери энергии в трубе с термоядерной взрывчаткой на эффекты рассеяния превышают ее приход от реакций синтеза ядер дейтерия 2_1H или трития 3_1H [1, 2, 13, 29]. В этой связи детонация от ядерного запала (от A -бомбы) в схеме "Труба" не может распространяться вдоль ее урановой трубы [1, 2]. А раз нет детонации в термоядерном горючем, то нет и реакции синтеза его легких ядер. 20 января 1949 года А.Д. Сахаров в Спецкомитет СССР представил свой первый отчет, в котором предложил новую схему построения H -бомбы, которая предусматривала наличие размещенной в центре сферы ядерной плутониевой A -бомбы и снаружи нее расположенных сферических слоев смеси жидкого дейтерия 2_1H и трития 3_1H , разделенных друг от друга полыми толстыми сферами из изотопа урана ${}^{238}_{92}U$ [1, 2, 29, 30]. Этому типу водородной бомбы в СССР был присвоен шифр РДС-6с ("Слойка") [1, 2, 21, 29]. Почти сразу выяснилось, что этот вид H -бомбы имеет такие серьезные недостатки [1, 2, 31]: а) водородная компонента бомбы была мала из-за количества ее сферических слоев порядка 10, что ограничивало мощность взрыва; б) тритий 3_1H очень дорог и недолговечен (период его полураспада составляет около полугода); в) жидкие изотопы дейтерия 2_1H и трития 3_1H необходимо поддерживать при криогенных температурах, что усложняет и существенно увеличивает габариты и вес термоядерной бомбы. Все это вместе побудило советского физика-теоретика В.Л. Гинзбурга предложить в сахаровской "Слойке" между сферическими слоями делящегося ядерного материала размещение твердого (порошкообразного) и относительно дешевого дейтерида лития-6 (повторение идеи американского физика-ядерщика Э. Теллера от 1947 года) [2, 31, 32]. Интересно отметить, что согласно [14] идея об использовании дейтерида лития-6 в качестве взрывчатого вещества для советских термоядерных бомб была в 1950 году независимо от В.Л. Гинзбурга предложена и ныне работающим в ННЦ "ХФТИ" д.ф.-м.н. О.А. Лаврентьевым. В разделе 1 были указаны важные преимущества размещения дейтерида лития-6 в H -бомбе (см. ядерную реакцию (3)). С учетом как считается в кругах ведущих физиков-ядерщиков предложения В.Л. Гинзбурга советская водородная бомба РДС-6с ("Слойка") приобрела реальные очертания. В феврале 1950 года было принято соответствующее Постановление СМ СССР по разработке и созданию водородной бомбы РДС-6с в рамках Атомного проекта СССР [2, 29, 30]. Научным руководителем работ по созданию первой советской водородной бомбы РДС-6с был назначен Ю.Б. Харитон, а его заместителями – И.Е. Тамм и Я.Б. Зельдович [2, 21, 29]. 12 августа 1953 года на ядерном полигоне СССР под г. Семипалатинском была испытана первая советская водородная бомба РДС-6с (рис. 19), мощность которой достигла 400 кт (40 кт – от взрыва A -бомбы; 80 кт – от реакции синтеза в термоядерном горючем; 280 кт – от реакции деления в оболочках из изотопа урана ${}^{238}_{92}U$), что практически в 20 раз превышало мощность первых атомных бомб США и СССР [21, 29, 30]. После успешного испытания советской H -бомбы "Слойка" И.В. Курчатов с глубоким

поклоном обратился к 32-летнему А.Д. Сахарову со следующими словами [31]: "Тебе, спасителю России, спасибо!".

Принято считать, что работа над H -бомбой стала по существу первой грандиозной интеллектуальной гонкой в истории человечества [31]. Для ее создания потребовались большие научные достижения в таких новых областях знаний как физика высокотемпературной плазмы, физика сверхвысоких плотностей энергии и физика аномальных давлений.



Рис. 19. Первая советская транспортабельная термоядерная бомба РДС-6с ("Слойка") мощностью 400 кт [2, 15, 17, 31]

В гетерогенной конструкции термоядерной бомбы "Слойка" были реализованы основополагающие физические идеи А.Д. Сахарова, ставшего сразу за данную суперважную научно-техническую разработку Героем Труда, а вскоре д.ф.-м.н. и академиком АН СССР [14, 31]. Его недаром называют "отцом" первой советской водородной бомбы. Считается, что создание первой советской водородной бомбы РДС-6с массой 7 т, в основе которой находились метод ионизационного суперсжатия термоядерного горючего для протекания в нем реакций синтеза и явление высокоэнергетических ядерных реакций деления в оболочках из изотопа урана ${}^{238}_{92}U$ за счет быстрых нейтронов от термоядерных реакций в изотопах водорода (дейтерий 2_1H и тритий 3_1H) [31], послужило в скором будущем главной причиной бурного развития в СССР космонавтики [3, 17]. После термоядерного испытания "Слойки" ОКБ будущего академика АН СССР С.П. Королева получило задание на разработку межконтинентальной баллистической ракеты для доставки изделия РДС-6с в любую точку земного шара [31]. Именно гражданский вариант этой ракеты вывел в 1957 году на околоземную орбиту первый искусственный спутник, а в 1961 году на ней стартовал первый космонавт нашей планеты Ю.А. Гагарин [31]. 6 ноября 1955 года в СССР было впервые проведено испытание H -бомбы без трития 3_1H , сброшенной с самолета Ту-16 [2, 20, 31]. В США сброс водородной бомбы с самолета состоялся лишь 21 мая 1956 года [31]. Весной 1954 года советские физики-ядерщики Я.Б. Зельдович и А.Д. Сахаров с целью развития работ по созданию мегатонных H -бомб пришли к идее "лучевой имплозии" для сверхсжатия термоядерной взрывчатки (метод взрывного инициатора, использующий рентгеновское излучение от взрыва "затравочной" A -бомбы для суперсжатия водородной компоненты H -бомбы) [2, 22, 31]. 22 ноября 1955 года на Семипалатинском ядерном полигоне с помощью са-

молета Ту-16 была испытана первая советская двухступенчатая водородная бомба мощностью 1,6 Мт, получившая кодовое обозначение РДС-37 и использующая "лучевую имплозию" [2, 15, 22, 31]. В СССР окончательной моделью серийно выпускавшейся двухступенчатой водородной бомбы считается изделие под кодовым названием РДС-49 [21]. Для того, чтобы показать империалистам "кузькину мать" руководителем СССР Н.С. Хрущевым 10 июля 1961 года было принято решение о создании советской водородной супербомбы мощностью 100 Мт (в конце концов, физики-ядерщики убедили Н.С. Хрущева остановиться на ее мощности в 50 Мт). За 112 дней данная термоядерная "Царь-бомба" (масса – 27 т; длина – 8 м; диаметр – 2 м), внешний вид которой приведен на рис. 20, была изготовлена (ее ядерный заряд разрабатывался в РЯФЦ–ВНИИЭФ, а собиралась эта уникальная бомба на Урале в РЯФЦ–ВНИИТФ) [2, 16, 17].



Рис. 20. Уникальная советская термоядерная супербомба (водородная "Царь-бомба") мощностью 50 Мт [2, 16, 17, 31]

Для транспортировки к месту сброса над северным ядерным полигоном СССР "Царь-бомбы" советский стратегический бомбардировщик Ту-95 (рис. 21) подвергся определенной доработке (эта крупногабаритная бомба не входила в его штатный бомболюк) [2, 16, 17]. 30 октября 1961 года данная бомба отделилась на высоте 10,5 км от бомбардировщика Ту-95 и снизилась на замедляющем ее падение парашюте до высоты 4 км над сушей испытательного ядерного полигона о. Новая Земля (СССР). За время ее падения в 188 с самолет Ту-95 успел в режиме скоростного пикирования удалиться на безопасное расстояние до 40 км от эпицентра термоядерного супервзрыва [17, 21].



Рис. 21. Советский стратегический бомбардировщик Ту-95 ("Атомный медведь"), с которого в 1961 году была сброшена над атомным полигоном о. Новая Земля (СССР) советская водородная супербомба мощностью 50 Мт [16, 17, 21]

30 октября 1961 года в 11 часов 32 минуты по московскому времени в заданной зоне указанного полигона произошел супервзрыв советской водородной "Царь-бомбы" (рис. 22) [2, 15-18]. Огненный шар от взрыва достиг земли и имел диаметр около 10 км. Световую вспышку от взрыва можно было наблюдать с расстояния в 1000 км. Мощный гул от взрыва был слышен на удалении 300 км от эпицентра. Ядерный "гриб" от этого взрыва поднялся в стратосферу на высоту до 65 км [2, 15-18]. После взрыва из-за ионизации земной атмосферы примерно на 1 час была прервана радиосвязь между соответствующими московскими службами и командным пунктом полигона [16].



Рис. 22. Ядерный "гриб" от воздушного взрыва в 1961 году на высоте около 4000 м над атомным полигоном о. Новая Земля (СССР) советской водородной супербомбы мощностью 50 Мт [17, 18]

Любопытно отметить, что ударная волна после взрыва водородной "Царь-бомбы" три раза обогнула земной шар (первый раз – за 36 часов 27 минут) [16-18]. Данное испытание имело огромное негативное воздействие на земную природу и позитивное военнополитическое значение. Взрывом этой водородной супербомбы СССР показал, что он в состоянии изготовить H -бомбу любого мегатоннажа. После этого испытания был прекращен рост мегатоннажа ядерного арсенала США. Советская термоядерная супербомба ("Царь-бомба") мощностью 50 Мт оказалась самым мощным взрывным устройством, когда-либо разработанным людьми и испытанным на Земле.

3. ДОСТИЖЕНИЯ ВЕЛИКОБРИТАНИИ, ФРАНЦИИ И КИТАЯ В РАЗРАБОТКЕ И СОЗДАНИИ ЯДЕРНОГО И ТЕРМОЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

В 1957 году Англией в ходе испытаний "Orange Herald" на о. Рождества в Тихом океане была взорвана самая мощная из когда-либо созданных на Земле ядерных плутониевых бомб мощностью около 700 кт [15, 33]. Эта бомба оказалась очень дорогой в производстве, так как в ее состав входило 117 кг делящегося оружейного изотопа плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ при его годовом производстве в Англии в то время 120 кг [15, 33]. В том же году на указанном тихоокеанском полигоне Англией было проведено наземное испытание своего первого термоядерного устройства "Short Granite" мощностью 300 кт, оказавшегося слабее советских и американских аналогов [15, 17]. 28 апреля 1958 года в ходе испытаний "Grapple Y" над о. Рождества была

сброшена с бомбардировщика и взорвана в воздухе самая мощная британская двухступенчатая термоядерная бомба мощностью до 3 Мт, построенная по американской схеме Улама-Теллера [13, 15]. Франция в ходе ядерных испытаний "Канопус" на тихоокеанских островах Полинезии взорвала в августе 1968 года свое первое термоядерное изделие мощностью 2,6 Мт по схеме, аналогичной ранее разработанной в США схеме Улама-Теллера [13, 15, 17]. На рис. 23 и 24 показаны общие виды соответственно начального и финального состояний ядерного "гриба" от этого ночного наземного французского термоядерного взрыва [17, 18]. Другими доступными в открытых литисточниках сведениями о развитии французской ядерной программы автор в настоящее время не располагает.



Рис. 23. Начальная стадия ядерного "гриба" от наземного взрыва в 1968 году французской термоядерной бомбы мощностью 2,6 Мт на тихоокеанском атолле Полинезии [17, 18]



Рис. 24. Финальная стадия ядерного "гриба" от наземного взрыва в 1968 году французской термоядерной бомбы мощностью 2,6 Мт на тихоокеанском атолле Полинезии [17, 18]

Китай в июне 1967 года осуществил свое первое испытание термоядерного устройства мощностью около 3,3 Мт, реализованного также по американской схеме Улама-Теллера [13, 15]. Следует обратить внимание на то, что данное термоядерное испытание было проведено по истечению всего 32 месяцев после взрыва китайскими физиками-ядерщиками своей первой ядерной плутониевой бомбы [15]. В мировой истории создания ядерного и термоядерного оружия этот атомный "китайский феномен" является самым коротким временным путем в национальных Атомных проектах и программах по переходу от взрывной ядерной реакции деления тяжелых ядер изотопов радиоактивных материалов к взрывной термоядерной реакции синтеза легких ядер вещества [15, 17, 33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Реализация в середине 20-го столетия в США и СССР грандиозных по своему размаху и глубине научно-промышленных эпопей позволила освоить внутриядерную энергию вещества и создать с ее помощью ядерное и термоядерное оружие огромной разрушительной силы. Мир на начальном этапе обладания этими сверхдержавами таким грозным оружием массового поражения оказался на грани своего полного уничтожения. Сверхусилия СССР и его талантливых ученых-физиков и инженеров в ущерб жизненно-го состояния своих граждан позволили добиться паритета в мировой гонке ядерного и термоядерного вооружения. Именно баланс взаимного сдерживания в развитии этого оружия ("баланс взаимного ядерного страха") в отношениях стран "ядерного клуба" мира стал в настоящее время тем главным международным фактором, который препятствует развязыванию ядерной войны и позволяет существовать на данном историческом этапе развития человечества нашему миру.

2. Благодарные потомки многонационального народа бывшего СССР будут еще долго помнить и чтить титанические усилия многих своих сыновей-героев и особенно выдающихся советских физиков-ядерщиков, в первом ряду которых находятся академики АН СССР, трижды Герои Труда Игорь Васильевич Курчатов, Юлий Борисович Харитон и Андрей Дмитриевич Сахаров, создавших указанное оружие возмездия и спасших мир от ядерного уничтожения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобец Б.С. Водородная бомба и Л.П. Берия на повороте истории СССР летом 1953 г. (Часть 1) // История науки и техники. – 2010. – №8. – С. 36-46.
2. Атомный проект СССР. Документы и материалы: В 3 Томах / Под общ. ред. Л.Д. Рябева. – Т. 1, 1938-1945: в 2 Частях. Ч. 1 / М-во РФ по атом. энергии; Отв. сост. Л.И. Кудинова. – М.: Наука, Физматлит, 1998. – 432 с.; Ч. 2: М.: Изд-во МФТИ, 2002. – 800 с.; Т. 2 в 7 Книгах. Атомная бомба. 1945-1954: Кн. 1, 1999. – 719 с.; Кн. 2, 2000. – 640 с.; Кн. 3, 2003. – 896 с.; Кн. 4, 2003. – 816 с. Кн. 5, 2005. – 976 с.; Кн. 6, 2006. – 896 с.; Кн. 7, 2007. – 696 с. / Федеральное агентство РФ по атом. энергии; Отв. сост. Г.А. Гончаров. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, М.: Физматлит; Т. 3 в 2 Книгах. Водородная бомба. 1945-1956. Кн. 1, 2008. – 736 с.; Кн. 2, 2009. – 600 с. / Гос. рос. корпорация по атом. энергии. Отв. сост. Г.А. Гончаров.
3. Наука и общество: история советского атомного проекта (40-50 годы) / Труды международного симпозиума ИСАП-96. В 3 Томах. – М.: ИздАТ: Т. 1, 1997. – 608 с.; Т. 2, 1999. – 528 с.; Т. 3, 2003. – 416 с.
4. Курчатовский институт. История атомного проекта. – М.: РНЦ "КИ", 1995-1998. – Вып. №1-16.
5. 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.
6. Сегре Э. Энрико Ферми – физик / Пер. с англ. под ред. акад. Б.М. Потековро. – М.: Мир, 1973. – 324 с.
7. Климов А.А. Большая книга знаний. – Харьков: Веста, 2010. – 160 с.
8. Иойрыш А.И. О чем звонит колокол. – М.: Политиздат, 1991. – 399 с.
9. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 4: Изобретение химических взрывчатых веществ // Электротехника і електромеханіка. – 2011.

- № 5. – С. 3-9.
10. Рузе М. Роберт Оппенгеймер и атомная бомба / Пер. с франц. – М.: Атомиздат, 1965. – 150 с.
 11. Юнг Р. Ярче тысячи звезд. – М.: Госатомиздат, 1961. – 224 с.
 12. Складенко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.
 13. http://www.ng.ru/ideas/2003-08-12/11_bomb.html.
 14. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: "Феникс", 2006. – 1176 с.
 15. <http://rocketpolk44.narod.ru/h-bomb.htm>.
 16. <http://nature.web.ru/db/simg.html?mid=1173455&n=0>.
 17. http://ru.wikipedia.org/wiki/Термоядерное_оружие.
 18. <http://votrube.ru/15501-vodorodnaja-bomba.html>.
 19. <http://ricolor.org/history/rsv/af/1/> Сталин и водородная бомба.
 20. Харитон Ю.Б., Смирнов Ю.Н. Мифы и реальность советского атомного проекта. – Арзамас-16: ВНИИЭФ, 1994. – 72 с.
 21. Горобец Б.С. Водородная бомба и Л.П. Берия на повороте истории СССР летом 1953 г. (Часть 2) // История науки и техники. – 2010. – № 10. – С. 18-30.
 22. Горобец Б.С. Миф 2-й: Опала П.Л. Капицы (1946-1953 гг.) – критический анализ причин и форм. Часть 2: Выход из атомного Спецкомитета и его последствия // История науки и техники. – 2010. – №4. – С. 49-64.
 23. Создание первой советской ядерной бомбы / Под ред. В.Н. Михайлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 448 с.
 24. Юлий Борисович Харитон: путь длиной в век / Ин-т хим.-физики. – М.: Наука, 2005. – 557 с.
 25. www.dominating.ru/atombomb/teory/history.htm.
 26. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
 27. Баранов М.И. Лев Давидович Ландау – основоположник Харьковской научной школы теоретической физики и квантовой физики конденсированного состояния материи // Электротехника и электромеханика. – 2008. – № 1. – С. 5-14.
 28. <http://www.Berkovich-zametki.com/Zametki/Nomer19/Gorelik.htm>.
 29. Харитон Ю.Б., Адамский В.Б., Смирнов Ю.Н. О создании советской водородной (термоядерной) бомбы // Успехи физических наук. – 1996. – № 2. – С. 201-205.
 30. Гончаров Г.А. Основные события истории создания водородной бомбы в СССР и США // Успехи физических наук. – 1996. – № 10. – С. 1095-1104.
 31. <http://n-t.ru/tp/it/bs.htm>.
 32. <http://www.idelo.ru/346/1.html>.
 33. http://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерное_оружие.

Bibliography (transliterated): 1. Gorobec B.S. Vodorodnaya bomba i L.P. Beriya na povorote istorii SSSR letom 1953 g. (Chast' 1) // Istoriya nauki i tehniki. – 2010. – №8. – S. 36-46. 2. Atomnyj projekt SSSR. Dokumenty i materialy: V 3 Tomah / Pod obsch. red. L.D. Ryabeva. – T. 1, 1938-1945: v 2 Chastyah. Ch. 1 / M-vo RF po atom. `energii; Otv. sost. L.I. Kudinova. – M.: Nauka, Fizmatlit, 1998. – 432 s.; Ch. 2: M.: Izd-vo MFTI, 2002. – 800 s.; T. 2 v 7 Knigah. Atomnaya bomba. 1945-1954: Kn. 1, 1999. – 719 s.; Kn. 2, 2000. – 640 s.; Kn. 3, 2003. – 896 s.; Kn. 4, 2003. – 816 s. Kn. 5, 2005. – 976 s.; Kn. 6, 2006. – 896 s.; Kn. 7, 2007. – 696 s. / Federal'noe agentstvo RF po atom. `energii; Otv. sost. G.A. Goncharov. Sarov: RFYaC-VNIIEF, M.: Fizmatlit; T. 3 v 2 Knigah. Vodorodnaya bomba. 1945-1956. Kn. 1, 2008. – 736 s.; Kn. 2, 2009. – 600 s. / Gos. ros. korporaciya po atom. `energii. Otv. sost. G.A.

Goncharov. 3. Nauka i obschestvo: istoriya sovetskogo atomnogo proekta (40-50 gody) / Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma ISAP-96. V 3 Tomah. – M.: Izdat: T. 1, 1997. – 608 s.; T. 2, 1999. – 528 s.; T. 3, 2003. – 416 s. 4. Kurchatovskij institut. Istoriya atomnogo proekta. – M.: RNC "KI", 1995-1998. – Vyp. №1-16. 5. Baranov M.I. Izbrannyye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 1: `Elektrofizika i vydayushchiesya fiziki mira. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2008. – 252s. 6. Segre `E. `Enriko Fermi – fizik / Per. s angl. pod red. akad. B.M. Potekorvo. – M.: Mir, 1973. – 324 s. 7. Klimov A.A. Bol'shaya kniga znaniy. – Har'kov: Vesta, 2010. – 160 s. 8. Iojrysh A.I. O chem zvonit kolokol. – M.: Politizdat, 1991. – 399 s. 9. Baranov M.I. Antologiya vydayushchiesya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 4: Izobrenenie himicheskikh vzryvchatyh veschestv // Elektrotehnika i elektromehaniка. – 2011. – № 5. – S. 3-9. 10. Ruze M. Robert Oppengejmer i atomnaya bomba / Per. s franc. – M.: Atomizdat, 1965. – 150 s. 11. Yung R. Yarche tysyachi zvezd. – M.: Gosatomizdat, 1961. – 224 s. 12. Sklyarenko V.M., Syadro V.V. Otkrytiya i izobreneniya. – Har'kov: Vesta, 2009. – 144 s. 13. http://www.ng.ru/ideas/2003-08-12/11_bomb.html. 14. Hramov Yu.A. Istoriya fiziki. – Kiev: "Feniks", 2006. – 1176 s. 15. <http://rocketpolk44.narod.ru/h-bomb.htm>. 16. <http://nature.web.ru/db/simg.html?mid=1173455&n=0>. 17. http://ru.wikipedia.org/wiki/Термоядерное_оружие. 18. <http://votrube.ru/15501-vodorodnaja-bomba.html>. 19. <http://ricolor.org/history/rsv/af/1/> Stalin i vodorodnaya bomba. 20. Hariton Yu.B., Smirnov Yu.N. Mify i real'nost' sovetskogo atomnogo proekta. – Arzamas-16: VNIIEF, 1994. – 72 s. 21. Gorobec B.S. Vodorodnaya bomba i L.P. Beriya na povorote istorii SSSR letom 1953 g. (Chast' 2) // Istoriya nauki i tehniki. – 2010. – № 10. – S. 18-30. 22. Gorobec B.S. Mif 2-j: Opala P.L. Kapicy (1946-1953 gg.) – kriticheskij analiz prichin i form. Chast' 2: Vyhod iz atomnogo Speckomiteta i ego posledstviya // Istoriya nauki i tehniki. – 2010. – №4. – S. 49-64. 23. Sozdanie pervoj sovetskoj yadernoj bomby / Pod red. V.N. Mihajlova i dr. – M.: `Energoatomizdat, 1995. – 448 s. 24. Yulij Borisovich Hariton: put' dlinoyu v vek / In-t him.-fiziki. – M.: Nauka, 2005. – 557 s. 25. www.dominating.ru/atombomb/teory/history.htm. 26. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 27. Baranov M.I. Lev Davidovich Landau – osnovopolozhnik Har'kovskoj nauchnoj shkoly teoreticheskoy fiziki i kvantovoy fiziki kondensirovannogo sostoyaniya materii // Elektrotehnika i elektromehaniка. – 2008. – № 1. – S. 5-14. 28. <http://www.Berkovich-zametki.com/Zametki/Nomer19/Gorelik.htm>. 29. Hariton Yu.B., Adamskij V.B., Smirnov Yu.N. O sozdanii sovetskoj vodorodnoj (termoyadernoj) bomby // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1996. – № 2. – S. 201-205. 30. Goncharov G.A. Osnovnye sobytiya istorii sozdaniya vodorodnoj bomby v SSSR i SShA // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1996. – № 10. – S. 1095-1104. 31. <http://n-t.ru/tp/it/bs.htm>. 32. <http://www.idelo.ru/346/1.html>. 33. http://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерное_оружие.

Поступила 04.03.2011

*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
Baranov M.I.*

An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 7: Nuclear and thermonuclear weapon creation.

A brief scientific and historical essay on the history of development of first samples of nuclear and thermonuclear weapon, it being both the acme of the human mind and ominous threat of the mankind extermination.

Key words – history, essay, nuclear and thermonuclear weapon.

ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ВСТРАИВАНИЯ В ОБОЛОЧКИ ОГРАНИЧЕННОГО ДИАМЕТРА ОБЪЕКТОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИХ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Виконано аналіз об'єктів використання, а також конструктивно – технологічних особливостей однофазних і трифазних трансформаторів компактного виконання систем підводно-технічного та іншого спеціального електрообладнання, визначено задачі і можливості удосконалення подібних трансформаторів перетворенням твірних контурів елементів та структурною оптимізацією електромагнітних систем.

Выполнен анализ объектов использования, а также конструктивных – технологических особенностей однофазных и трехфазных трансформаторов компактного исполнения систем подводно-технического и другого специального электрооборудования, определены задачи и возможности усовершенствования подобных трансформаторов преобразованием образующих контуров элементов и структурной оптимизацией электромагнитных систем.

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние технического прогресса характеризуется интенсификацией работ по подводным исследованиям, разведке и освоению шельфа, а также расширением исследований внеземного пространства. Важнейшими стратегическими целями, связанными с возможностями дальнейшего развития и существования человечества, являются будущее освоение, в дополнение к шельфу, значительных глубин земного океана, солнечной системы и дальнего космоса. Интенсифицируется также потребление наземных и подземных природных ресурсов, в частности жидкостно-газовых топливно-энергетических и водных. В связи с этим в развитых странах мира уделяется серьезное внимание разработке возобновляемых источников энергии, в том числе энергии морских волн, приливов и отливов. Решение названных весьма сложных современных задач и обеспечение предпосылок достижения перспективных значительных целей требует непрерывного усовершенствования и развития соответствующих технических средств, включающих системы электрооборудования и автоматики со специальными электромеханическими, электронно-микропроцессорными и приборными комплексами. Указанные комплексы содержат габаритные и металлоемкие компоненты – встроенные и погружные трансформаторы. Важными показателями таких трансформаторов являются компактность, конструктивное соответствие блокам электрооборудования и удобство встраивания. В настоящее время в Украине эксплуатируются, а специализированными заводами производятся трансформаторы с "традиционными" техническими решениями электромагнитных систем (ЭМС) [1, 2]. При этом согласно [3], потери электроэнергии в распределительных сетях Украины составляют до 20 % мощности, отпущенной генерирующими станциями. Значительную долю этой части составляют потери в трансформаторах I-II габаритов классов напряжения 6-35 кВ. Указанное обстоятельство, требованья минимальных массогабаритных показателей, компактности и надежности, предъявляемые к специальному электрооборудованию [4, 5], показывают важность и актуальность разработки специальных и усовершенствования распределительных трансформаторов различной мощности.

Целью работы является анализ специфики применения, существующих аналогов и технических решений усовершенствования, а также постановка зада-

чи разработки трансформаторов систем электрооборудования объектов специальной техники.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ И СИСТЕМЫ С КОМПАКТНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Аппараты и комплексы подводного поискового, подводно-технического [4-10] и авиационно-космического [11, 12] назначений, а также судовые навесные погружные капсулы [13], по типам внешнего корпуса и оболочек размещения элементов технических систем подразделяются на обтекаемые (рис. 1,а,б) и рамные (рис. 1,в), а также на содержащие прочные сферические (рис. 1,а) и цилиндрические трубчатые (рис. 1,б,в) оболочки ограниченного диаметра.

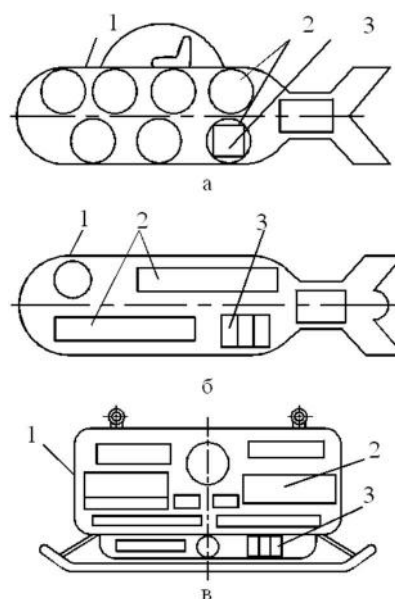


Рис. 1. Конструктивные схемы самоходного обитаемого (а) и необитаемого (б), а также спускаемого (в) подводных аппаратов: 1 – корпус; 2 – оболочка системных блоков и элементов; 3 – трансформатор

Разработанными в Николаевском кораблестроительном институте (Национальном университете кораблестроения) имени адмирала Макарова подводными техническими объектами [6] с электрооборудованием, заключенным в цилиндрические трубчатые оболочки, являются самоходные аппараты "Атлеш" и "The North Star", а также спускаемые рамные аппараты "Агент-1" (рис. 2) и "Софокл".



Рис. 2. Спускаемый подводный аппарат рамного исполнения "Агент-1"

Подводными техническими объектами [7] с внутрикорпусными и внешними сферическими оболочками комплектующего оборудования являются самоходные аппараты "Скарус" (рис. 3) и "МТК-200" (рис. 4).

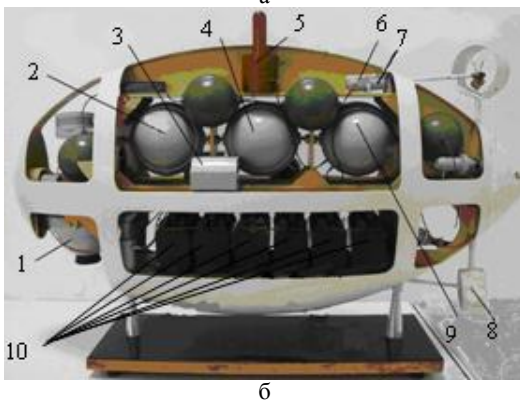
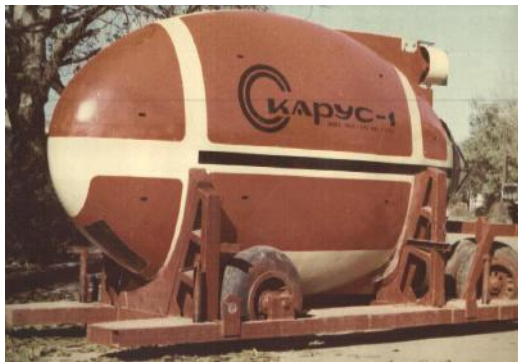


Рис. 3. Необитаемый автономный самоходный спускаемый аппарат "Скарус-1": 1 – полезный груз; 2 – навигационная и информационно-управляющая системы;

3 – крено-дифференциальная система; 4 – блок трансформатора; 5 – система связи; 6 – гребной электродвигатель; 7 – редуктор; 8 – гребной винт; 9 – регулируемой преобразователь; 10 – аккумуляторная батарея

Примерами подводных технических объектов, содержащих "навесные" трансформаторы являются спускаемые водолазные камеры ("колокола") глубоководных комплексов "ГВК" [8]. Такие комплексы базируются на судах-носителях и обеспечивают погружение акванавтов на глубины до 500 м при морском подводном исполнении и на глубины до 1000 м при герметичном исполнении силового электрооборудования. Элек-

троснабжение системы электрооборудования (рис. 5,а) водолазного колокола линейным напряжением 27 В обеспечивается через кабель-шланг-трос с входным напряжением до 1000 В на судне-носителе. Погружной понижающий трехфазный трансформатор размещен в отдельном корпусе в верхней части колокола (рис. 5,б). Пониженное напряжение используется для питания электродвигателей агрегатов подогрева и очистки дыхательно-газовой смеси и цепей внутреннего электрического освещения.



Рис. 4. Самоходный (в погружном и доном положениях) спускаемый подводный аппарат "МТК-200"

Известны также разработки волновых и приливных электростанций [10], которые могут комплектоваться "подвесными" и "обтекаемыми" погружными трансформаторами. Приливные электростанции содержат турбины в туннельных цилиндрических корпусах соединяющих наполнительные бассейны с морем. В процессе чередования приливов и отливов ротор генератора вращается противоположно. Массогабаритные и энергетические характеристики генерирующего агрегата могут быть улучшены, на основе внешнего естественного принудительного водяного охлаждения, при встраивании в цилиндрический корпус турбины генератора и погружного трансформатора. Разработка подобного трансформатора с соответствием конфигурации активно-конструктивной части направленному вдоль оси агрегата потоку охлаждения и погружное исполнение генератора обеспечат максимальные удельные показатели электрохимической системы генерирования энергии [13].

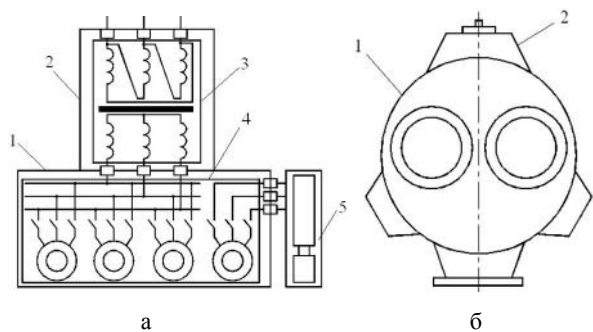


Рис. 5. Упрощенная электрическая схема с составом силового электрооборудования (а) водолазного колокола (б):

1 – корпус колокола; 2 – корпус трансформатора; 3 – трансформатор; 4 – система электрооборудования агрегатов подогрева и очистки дыхательно-газовой смеси, 5 – блок преобразователя и аккумуляторной батареи

Трехфазные группы с однофазными тороидальными трансформаторами встроенными, совместно с электродвигателями ограниченного диаметра, в конечных трубчатых элементах, являются важными составляющими систем электропривода скваженных насосов и бурового оборудования. Согласно [14], в насосах добычи нефти и в электрических бурах используются асинхронные двигатели с малыми диаметрами и повышенными длинами десяти типоразмеров ПЭД 20...ПЭД 125 мощностью 20-125 кВт с различными рабочими напряжениями от 700 до 2000 В. Все двигатели ПЭД получают энергию от питающих кабелей с рабочим напряжением 3300 В и внешних трансформаторов соответствующей мощности. Потери напряжения при передаче энергии к погруженному электромеханическому блоку, в зависимости от номинального напряжения и мощности ПЭД, составляет 16-55 В [14].

АНАЛОГИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВСТРАИВАЕМЫХ КОМПАКТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

На массогабаритные и энергетические показатели, а также надежность входящего в объекты подводной, авиационно-космической и погружной насосно-буровой техники [4-14] блочного оборудования в прочных цилиндрических и сферических оболочках существенно влияют трансформаторы. Наиболее востребованные в "традиционном" производстве индукционных статических устройств планарные ЭМС однофазных и трехфазных трансформаторов [1, 2] не удовлетворяют условиям компактного встраивания в указанные оболочки и характеризуются массогабаритными показателями, не соответствующими требованиям объектов специальной техники. Конструктивно приспособленными для размещения в ограниченных сферических и цилиндрических объемах являются симметричные пространственные ЭМС [5, 8]. Трансформаторы с трехфазными ЭМС размещаются в сферических (рис. 1,а), навесных (рис. 5) или подвесных корпусах [5, 8, 13]. В трубчатые корпуса-оболочки ограниченного диаметра устанавливаются групповые трехфазные преобразователи с однофазными тороидальными трансформаторами (рис. 1,б,в) [6].

Тороидальные трансформаторы [1] содержат один из однофазных вариантов пространственных структур ЭМС с конфигурацией внешнего контура, которая соответствует окружности (рис. 6). Их особенностью является неплотная укладка витковых проводников над торцевыми поверхностями кольцевого магнитопровода. Наличие полых пространств между витками (рис. 6) обусловлено различием величин диаметров $D_{\text{н}}$ и $D_{\text{в}}$ кольцевого магнитопровода и учитывается при расчетах трансформаторов увеличенными на 8-15 % значениями коэффициента укладки обмотки. Указанная неплотность а также смещения на угол α_m противоположных торцевых участков витка (рис. 6,а), повышают среднюю длину витка, потери и материалоемкость обмотки. Вызванное участками полного пространства ухудшение теплоотвода, а также малый радиус изгиба на 90° угловых зон внутренних витков, снижают надежность тороидальных трансформаторов (рис. 6).

Трехфазные пространственные симметричные аксиальные ЭМС (рис. 7) трансформаторов с улучшенными массогабаритными показателями и пониженными

потерями в стали выполняются на стыковых комбинированных (шихтованных стержнях, витые ярма) и витых (с двухконтурными фазными элементами) магнитопроводах. Наилучшими массогабаритными показателями (вторая половина прошлого века) отличалась ЭМС (рис. 7,а), а использование в ЭМС (рис. 7,б) текстурованной электротехнической стали (ЭТС) обеспечило минимальные потери в стали трансформатора [2].

В "традиционных" конструкторско-технологических решениях активной части трансформаторов малой, средней и большой мощности [1, 2] структуры планарных и пространственных ЭМС сформированы плоскими параллельными, а также цилиндрическими образующими поверхностями (ОП) стержней и обмоточных окон [15].

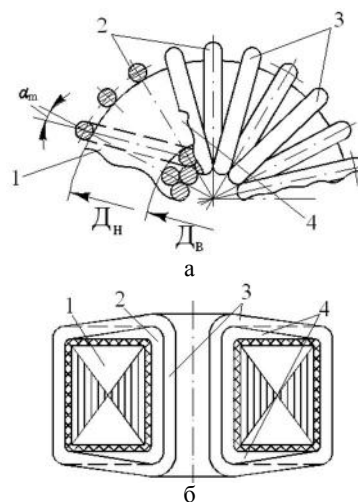


Рис. 6. Конструктивно-технологические особенности на фрагменте вида сверху (а) и поперечном разрезе (б) тороидальной электромагнитной системы:
1 – магнитопровод; 2 – витки первого (внутреннего) слоя;
3 – витки второго слоя; 4 – пустое пространство

Плоские ОП планарных ЭМС массового выпуска обеспечивают низкую трудоемкость производства шихтованных и витых магнитопроводов на основе фактора идентичности ширины слоев ЭТС в сечении стержней, но создают прямоугольную форму витков катушек обмоток. Прямоугольная форма (внутренние витки на рис. 6,б) повышает среднюю длину витка и снижает прочность изоляции при малом радиусе прямоугольного изгиба проводника [2]. Криволинейная форма витков катушек с цилиндрическими ОП (рис. 7) уменьшает среднюю длину витка, но значительно усложняет и удорожает технологию производства магнитопроводов.

Технология усложняется необходимостью набора сечений стержней (рис.7,а) и ярем (в планарных магнитопроводах) из секций ЭТС различной ширины, а также необходимостью навивки фазных элементов (рис. 7,б) из ленты (рулона) ЭТС изменяющейся ширины [2]. Другим недостатком планарных и пространственных ЭМС с цилиндрическими ОП является изменяющаяся (на рис. 7 – в радиальном направлении) площадь и неравномерное заполнение обмоточного окна проводящим и изоляционно-конструкционными материалами обмотки, что повышает материалоемкость и потери в стали магнитопровода [15].

При проектных исследованиях силовых трансформаторов [2] основными являются характеристики определяющие энергетические и стоимостные показатели технического уровня (ПТУ). При специальном

исполнении трансформаторов (измерительные, сварочные, преобразовательные, встраиваемые, ...) к их конструкциям и характеристикам предъявляются соответствующие специфические требования.

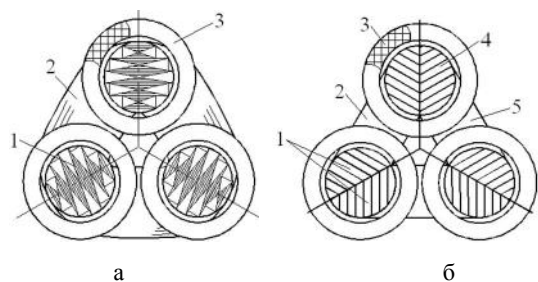


Рис. 7. Конструктивные схемы (в поперечном сечении) трёхфазных пространственных электромагнитных систем с комбинированным (а) и витым (б) магнитопроводами и цилиндрическими образующими поверхностями стержней и обмоточных окон: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки; 4 – стержневой участок фазного элемента магнитопровода; 5 – ярменный участок фазного элемента магнитопровода

Массогабаритные и другие технические характеристики блоков и систем электрооборудования, а также рассмотренных выше объектов техники в целом, могут быть существенно улучшены преобразованием структур ЭМС и приданием трансформаторам форм соответствующих указанным блокам [4-15].

Оценка результативности структурных преобразований ЭМС может быть выполнена методом, заключающимся в представлении оптимизационной целевой функции $F_{цфi}$ в виде произведения двух сомножителей [16, 17]

$$F_{цфi} = \left(4\sqrt{\Pi_{ид}}\right)^3 F_{пi}. \quad (1)$$

Первый сомножитель (1) является функцией исходных данных и электромагнитных нагрузок в виде показателя исходных данных $\Pi_{ид}$, определяющегося номинальной мощностью, средним значением амплитуды индукции в стержне, частотой сети, плотностями токов обмоток, энергетическими коэффициентами нагрузки и трансформатора, изменением напряжения под нагрузкой, а также предварительно заданным коэффициентом полезного действия трансформации энергии. Второй сомножитель (1) является функцией одного из трех ($i = 3$) ПТУ, а именно относительных показателей массы $F_{пм}$, стоимости $F_{пс}$ и потерь активной мощности $F_{пн}$ ЭМС. Каждый из относительных показателей $F_{пi}$ является функцией коэффициента заполнения обмоточного окна проводящим материалом обмотки (класса напряжения) K_{30} и трех универсальных (идентичных и приемлемых для любой из существующих и возможных вариантов ЭМС [17] геометрических управляемых переменных: отношения a_m диаметров расчетных окружностей магнитопровода, отношения λ_0 высоты и ширины обмоточного окна и расчетного контурного угла стержня α_c [16]

$$F_{пi} = f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c). \quad (2)$$

Структурная оптимизация вариантов ЭМС трансформатора заключается в сравнительном анализе совокупности $F_{пi}$ при соблюдении принципа электромагнитной эквивалентности ЭМС. Этому принципу соответствуют идентичности мощности, напряжений обмоток, назначения и исполнения при одинаковых электромагнитных нагрузках сравниваемых ЭМС. Сравни-

тельный анализ выполняется на основе оптимизации вариантов ЭМС по целевой функции (2) и частным критериям, то есть определением и сопоставлением экстремальных значений $F_{пi\min}$, $F_{пс\min}$, $F_{пн\min}$. При этом, в зависимости от частного критерия, $F_{пi}$ является также функцией соотношения плотностей, стоимостей или удельных потерь активных материалов. Первый сомножитель (1) при структурной оптимизации ЭМС не используется и принимается, в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности, идентичным для сравниваемых ЭМС. Этот сомножитель может быть использован в поэтапной параметрической оптимизации трансформатора конкретного исполнения при заданных проектных ограничениях.

Геометрические соотношения ЭМС трансформаторов входящих в системы специального электрооборудования должны соответствовать особенностям соответствующих объектов техники [4-14]. Исходя из изложенной выше специфики, кроме главных массо-стоимостных и энергетических ПТУ, при сравнительном анализе возможных вариантов ЭМС указанных трансформаторов во внимание должен применяться показатель заполнения контурного сферического (цилиндрического) объема

$$\Pi_{oc(ц)} = V_{эмс} / V_{c(ц)}, \quad (3)$$

где $V_{эмс}$ – геометрический объем ЭМС трансформатора; $V_{c(ц)}$ – объем охватывающей максимальные габаритные размеры ЭМС сферы (цилиндра).

Нетрадиционным техническим решением повышения компактности трехфазного трансформатора является использование пространственной аксиальной ЭМС [5, 15] с секторными образующими контурами сечений стержней, обеспечивающими параллельность стенок обмоточных окон (рис. 8,а). Однако витой стыковый магнитопровод ЭМС (рис. 8,а), как и магнитопровод ЭМС (рис. 7, а) содержит ярма с плоскими параллельными стыковыми и внешними торцевыми поверхностями, что не вполне соответствует сферической форме.

Повышенным заполнением описанной окружности и сферического объема при встраивании отличается исходное техническое решение трехфазного трансформатора [18] с внешним кольцевым ярмом и симметричным радиальным расположением стержней шихтованного стыкового магнитопровода (рис. 8,б). Первый трехфазный трансформатор схемы (рис. 8,б) не нашел дальнейшего практического применения в связи со значительными отходами ЭТС при изготовлении магнитопровода и последующей разработкой трехфазного планарного магнитопровода шихтованного "впереплет" из прямоугольных листов ЭТС [18].

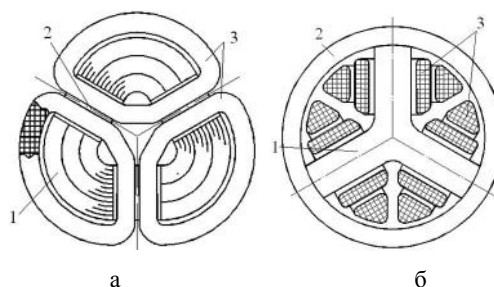


Рис. 8. Конструктивные схемы (в поперечном сечении) трёхфазных пространственных аксиальной (а) и радиальной (б) электромагнитных систем повышенной компактности: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

ВАРИАНТЫ СТРУКТУРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОМПАКТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Отмеченные выше недостатки и конструктивно-структурные особенности различных вариантов ЭМС указывают на необходимость усовершенствования трансформаторов рассмотренного назначения исходя из условия повышения показателя (3). В качестве аналогов разработки специальных компактных однофазных и трехфазных трансформаторов могут быть взяты варианты пространственных ЭМС (рис. 6-8), которые усовершенствуются структурным преобразованием магнитопроводов и обмоток. Исходя из концепции многоплоскостных ОП и $n \geq 3$ образующих контуров элементов активной части [15], конфигурации однофазной и трехфазных ЭМС преобразуются до видов (рис. 9-11).

На рис. 9 представлена однофазная ЭМС с трехстержневыми шихтованным "впереплет" (рис. 9,а) и витым разрезным (рис. 9,б) магнитопроводами, а также трехугольной первичной (вторичной) обмоткой.

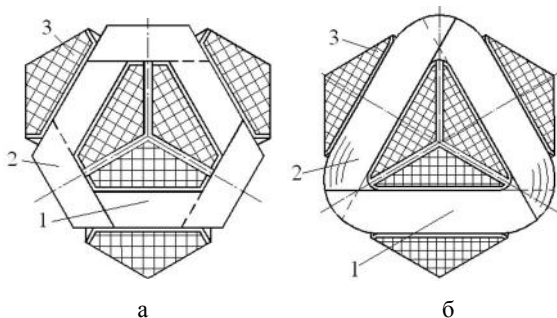


Рис. 9. Варианты конструктивных схем (в поперечном сечении) однофазной пространственной электромагнитной системы с трёхстержневым шихтованным "впереплет" (а) и витым стыковым секционированным (б) магнитопроводами: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

Структура обмоток ЭМС (рис. 9) аналогична обмоткам планарных ЭМС [1, 2] и лишена известных отмеченных выше недостатков тороидальной намотки.

На рис. 10 изображены варианты трехфазной радиальной ЭМС с двухконтурными фазными элементами шихтованного "впереплет" (рис. 10,а) и витого разрезного (рис. 10,б) магнитопроводов. Рис. 11 характеризует конструктивно-технологические особенности трехфазной аксиальной ЭМС (рис. 11,а) с двухконтурными фазными элементами и шестигранным сечением стержней витого магнитопровода. Каждая секция (рис. 11,б) трехсекционного магнитопровода ЭМС (рис. 11,а) навивается, с целью обеспечения заданной формы сечения стержня, из ленты (рулона) ЭТС с осевым смещением витков [15].

Все варианты нетрадиционных конструкций компактных ЭМС (рис. 9-11) характеризуются "безотходной" технологией изготовления магнитопроводов известными способами из исходного рулона ЭТС постоянной ширины. При организации их серийного изготовления не требуется коренной перестройки существующего производства трансформаторов.

Для решения задач практического использования новых технических решений активной части трансформаторов компактного исполнения необходима разработка, на основе (1) – (3), соответствующих математических моделей структурной оптимизации и методик расчета геометрических соотношений вариантов ЭМС (рис. 9-11).

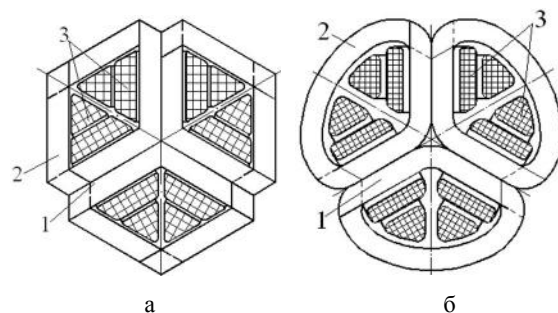


Рис. 10. Варианты конструктивных схем (в поперечном сечении) трёхфазной пространственной электромагнитной системы с двухконтурными фазными элементами шихтованного "впереплет" (а) и витого стыкового секционированного (б) магнитопроводов: 1 – стержневой участок фазного элемента; 2 – яремный участок фазного элемента; 3 – катушка обмотки

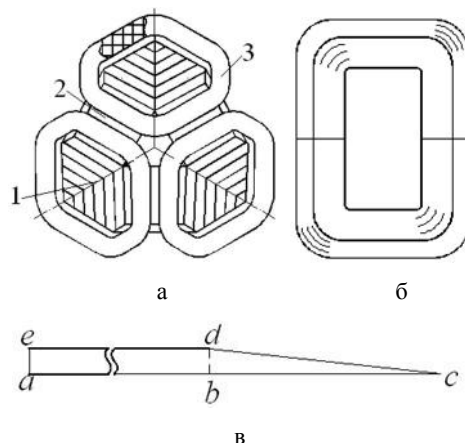


Рис. 11. Конструктивная схема (в поперечном сечении) трёхфазной пространственной аксиальной электромагнитной системы с трехсекционным магнитопроводом (а), секция магнитопровода (б) и заготовка ленты электротехнической стали (в) для навивки секции магнитопровода: 1 – стержневой участок фазного элемента; 2 – яремный участок фазного элемента; 3 – катушка обмотки

ВЫВОДЫ

1. Структура и геометрические соотношения ЭМС компактных трансформаторов, в частности электроэнергетических систем подводных аппаратов и комплексов, должны соответствовать сферам и цилиндрам минимальных диаметров и, совместно с другим оборудованием, максимально заполнять их внутренний объем.

2. Технические решения традиционных и состоящих в производстве ЭМС однофазных и трехфазных трансформаторов не удовлетворяют в достаточной степени требованиям компактности и надежности.

3. Усовершенствование и повышение показателей компактности трансформаторов при использовании традиционных способов и вариантов "безотходной" технологии производства магнитопроводов может быть достигнуто на основе структурной оптимизации ЭМС с нетрадиционной конфигурацией стержней, ярем и катушек обмоток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектрики. – М.: Сов. Радио, 1971. – 720 с.
2. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 5-е изд. Перераб. и доп. – М. Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

3. Шидловський А.К., Федоренко Г.М. Макроекономічні та електротехнічні тренди в електроенергетиці України 1900-2000 р. // Техн. електродинаміка. – 2002. – № 5. – С. 3-12.
4. Блинцов В.С. Проблемы и пути развития электрооборудования и автоматики подводных аппаратов// Проблемы автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2007. – С. 257-269.
5. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 1. – С. 44-48.
6. Блинцов В.С. Привязные подводные системы. – Київ: Наукова думка, 1998. – 232 с.
7. Блинцов С.В. Автоматичне керування автономними підводними апаратами в умовах невизначеності. – Миколаїв: ТОВ "Фірма Іліон", 2008. – 204 с.
8. Ставинский А.А., Забора И.Г. Усовершенствование оборудования водолазных комплексов на основе специальных исполнений электромеханических устройств// Проблемы автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю – Миколаїв: НУК, 2006. – С. 194-202.
9. Милн П. Подводные инженерные исследования.– Л.: Судостроение, 1984. – 340 с.
10. Коробков В.А. Преобразование энергии океана – Л.: Судостроение, 1986. – 280 с.
11. Куландин А.А., Тимашов С.В., Иванов В.П. Энергетические системы космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1972. – 427 с.
12. Основы электрооборудования летательных аппаратов. Ч.1,2 / Под ред Д.Э. Брускина. – М: Высш. школа, 1978. – 263 с.
13. Ставинский А.А., Шевченко В.В., Чекунов В.К. Возможности усовершенствования судовых электромеханических комплексов на основе нетрадиционных технических решений электрических машин // Электронне видання "Вісник Національного університету кораблебудування" – Миколаїв: НУК, 2010. – № 2. – С. 98-105.
14. Месенжник Я.З., Осягин А.А. Силовые кабельные линии для погружных электросистем. – М.: Энергоатомиздат, – 1987. – 240 с.
15. Ставинский А.А., Ставинский Р.А. Классификации структур и элементов электромагнитных систем электромеханических и индукционных статических преобразователей// Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 53-58.
16. Ставинський Р.А. Масо-вартісна модель трифазного трансформатора малої потужності з просторовим магнітопроводом // Preseedings of the "4th Internatoinal modeling school of AMSE-UAPL" Crimea, Alushta, September 12-17. – Rzeszow, Poland. – 2000. P. 245-248.
17. Ставинский Р.А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств// Вісник КДУ.– Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 4, Ч.2. – С. 91-94.
18. Веселовский О.Н., Копылов И.П. У истоков электромеханики. Столетие трансформатора // Электротехника. – 1984. – № 11. – С. 62-63.
19. Заявка на выдачу патенту України на винахід № а 201104987, МПК НО1F 27/24. Магнітопровід індукційного статичного пристрою// А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, Е.А. Авдеева, А.С. Садовий, А.М. Циганов; Заявл. 20.04.2011.

Bibliography (transliterated): 1. Bal'yan R.H. Transformatory dlya radio`elektriki. - M.: Sov. Radio, 1971. - 720 s. 2. Tihomirov P.M. Raschet transformatorov: Uchebnoe posobie dlya vuzov. - 5-e izd. Pererab. i dop. - M. `Energoatomizdat, 1986. - 528 s. 3. Shidlovskij A.K., Fedorenko G.M. Makroekonomichni ta elektrotehnichni trenди v elektroenergetici Ukraїni 1900-2000 r. // Tehn. elektrodinamika. - 2002. - № 5. - S. 3-12. 4. Blincov V.S. Problemy i puti razvitiya `elektrooborudovaniya i avtomatiki podvodnyh apparatov// Problemy avtomatiki ta

elektroobladnannya transportnih zasobiv: Materiali Vseukraїns'koi nauk.-tehn. konf. z mizhnarodnoyu uchastyu. - Mikolaїv: NUK, 2007. - S. 257-269. 5. Stavinskij A.A. Osobennosti naznacheniya i ispol'zovaniya special'nyh `elektricheskikh mashin // Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2008. - № 1. - S. 44-48. 6. Blincov V.S. Privyaznye podvodnye sistemy. - Kiїv: Naukova dumka, 1998. - 232 s. 7. Blincov S.V. Avtomatichne keruvannya avtonomnimi pidvodnimi aparatami v umovah neviznachenosti. - Mikolaїv: TOV "Firma Ilion", 2008. - 204 s. 8. Stavinskij A.A., Zabora I.G. Usovershenstvovanie oborudovaniya vodolaznyh kompleksov na osnove special'nyh ispolnenij `elektromehaniчeskikh ustrojstv// Problemy avtomatiki ta elektroobladnannya transportnih zasobiv: Materiali Vseukraїns'koi nauk.-tehn. konf. z mizhnarodnoyu uchastyu - Mikolaїv: NUK, 2006. - S. 194-202. 9. Miln P. Podvodnye inzhenernye issledovaniya.- L.: Sudostroenie, 1984. - 340 s. 10. Korobkov V.A. Preobrazovanie `energii okeana - L.: Sudostroenie, 1986. - 280 s. 11. Kulandin A.A., Timashov S.V., Ivanov V.P. `Energeticheskie sistemy kosmicheskikh apparatov. - M.: Mashinostroenie, 1972. - 427 s. 12. Osnovy `elektrooborudovaniya letatel'nyh apparatov. Ch.1,2 / Pod red D. E. Bruskina. - M: Vyssh. shkola, 1978. - 263 s. 13. Stavinskij A.A., Shevchenko V.V., Chekunov V.K. Vozmozhnosti usovershenstvovaniya sudovyh `elektromehaniчeskikh kompleksov na osnove netradicijnyh tehniчeskikh reshenij `elektricheskikh mashin // Elektronne vidannya "Visnik Nacional'nogo universitetu korablebuduvannya" - Mikolaїv: NUK, 2010. - № 2. - S. 98-105. 14. Mesenzhnik Ya.Z., Osyagin A.A. Silovye kabel'nye linii dlya погружных `elektrosistem. - M.: `Energoatomizdat, - 1987. - 240 s. 15. Stavinskij A.A., Stavinskij R.A. Klassifikacii struktur i `elementov `elektromagnitnyh sistem `elektromehaniчeskikh i indukcijnyh staticheskikh preobrazovatelej// Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2008. - № 2. - S. 53-58. 16. Stavinskij R.A. Maso-vartisna model' trifaznogo transformatora maloї potuzhnosti z prostоровim magnitoprovodom // Preseedings of the "4th Internatoinal modeling school of AMSE-UAPL" Crimea, Alushta, September 12-17. - Rzeszow, Poland. - 2000. P. 245-248. 17. Stavinskij R.A. Netradicijnyye tehniчeskie resheniya, postanovka zadachi i metod struktурnoj optimizacii indukcijnyh staticheskikh ustrojstv// Visnik KDU.- Kremenчuk: KDU, 2010. - Vip. 4, Ch.2. - S. 91-94. 18. Veselovskij O.N., Kopylov I.P. U istokov `elektromehaniки. Stoletie transformatora // `Elektrotehnika. - 1984. - № 11. - S. 62-63. 19. Zayavka na vidachu patentu Ukraїni na vinahid № a 201104987, MPK NO1F 27/24. Magnitoprovod indukciynogo statichnogo pristroyu// A.A. Stavinskij, R.A. Stavinskij, E.A. Avdeeva, A.S. Sadovij, A.M. Ciganov; Zayavl. 20.04.2011.

Поступила 04.11.2011

*Блинцов Владимир Степанович, д.т.н., проф.,
Авдеева Елена Андреевна, м.н.с.*

Национальный университет кораблестроения
им адмирала Макарова
54025, Николаев. пр. Героев Сталинграда, 9
тел. (0512) 431174, e-mail: blintsov@mksat.net.

*Ставинский Ростислав Андреевич, к.т.н. доц.,
Садовой Алексей Степанович*

Николаевский государственный аграрный университет
кафедра энергетики аграрного производства
54010, Николаев, ул. Парижской коммуны, 9
тел. (0512) 399301, (063) 3641043,
e-mail: strostand@mail.ru, sadovuy@rambler.ru

Blintsov V.S., Stavinskij, Avdeeva E.A., Sadovoy A.S.
**Transformers for specialized engineering objects
embedding into limited-diameter shells and their
improvement problem formulation.**

Analysis of application objects and design features of compact single- and three-phase transformers of underwater and other specialized electrical equipment is performed. Problems and opportunities of the transformers improvement through transformation of the generatrix of element contours and structural optimization of electromagnetic systems are specified.

Key words – spherical and cylindrical shells, built-in transformer, compact electromagnetic system.

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ГРАНИЧНОГО УСЛОВИЯ НА ЛИНИИ ЗАЗОРА ПРИ РАСЧЕТЕ ВЕКТОРНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ОБМОТОЧНОМ ОКНЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Розглядається плоскопаралельний електромагніт, для якого відомо аналітичний вираз розподілу векторного потенціалу в обмотувальні вікні. На основі використання цього виразу, проведено аналіз можливості адекватного розрахунку магнітного потоку з області зазору в область обмотувального вікна. Показано, що допущення про однорідному полі в зазорі вимагає коректування відповідного розрахункового вираження. Безпосереднім розрахунком визначено значення коефіцієнта, що використовується для відповідної корекції.

Рассматривается плоскопараллельный электромагнит, для которого известно аналитическое выражение распределения векторного потенциала в обмоточном окне. На основе использования этого выражения, проведен анализ возможности адекватного расчета магнитного потока из области зазора в область обмоточного окна. Показано, что допущение об однородном поле в зазоре требует корректировки соответствующего расчетного выражения. Непосредственным расчетом определено значение корректирующего коэффициента.

ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматривается обмоточное окно плоскопараллельного электромагнита сердечник, которого имеет зазор (рис. 1). Такие электромагниты нашли широкое применение в отечественной и зарубежной промышленности как основа различных электромагнитных механизмов и электрических аппаратов.

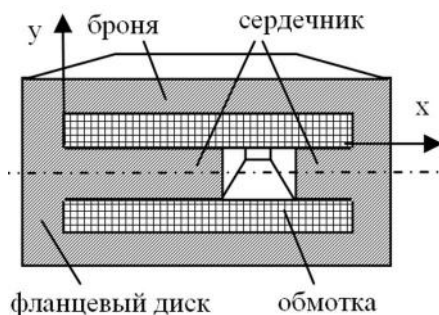


Рис. 1. Плоскопараллельный электромагнит

Расчет таких электромагнитов включает в себя, в качестве одного из этапов, расчет потоков проходящих в обмоточном окне электромагнитов. Этот расчет можно осуществить на основе решения для области обмоточного окна уравнения Пуассона для векторного потенциала магнитного поля. Для симметричного зазора такое решение приведено в работе [1] для несимметричного обмоточного окна такое решение приведено в работе [2].

В обеих этих работах, для границ зоны обмоточного окна (рис. 2) принимаются традиционные граничные условия:

- магнитная проницаемость железа принимается равной бесконечности (идеальное железо);
- индукция магнитного поля на поверхности обмотки, не закрытой железом направлена вдоль оси катушки и имеет постоянное значение;
- распределение электрического тока по сечению обмотки намагничивания является равномерным (плотность тока в проводниках обмотки постоянна).

При этом решение соответствующего уравнения Пуассона, проведено и в [2], и в [3] методом разделения переменных. Это дало согласующиеся между со-

бой аналитические выражения для векторного потенциала в виде бесконечного тригонометрического ряда.

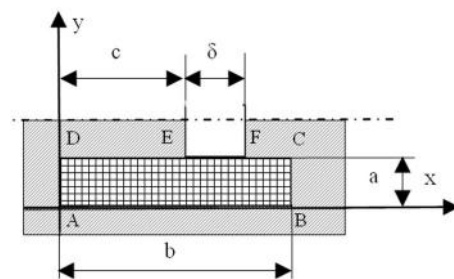


Рис. 2. Плоскопараллельная модель зоны обмоточного окна

В прочем, в [2] второе из указанных граничных условий считается вносящим погрешность в расчетные выражения для магнитных потоков в обмоточном окне и их суммарной проводимости. А именно, в [2] показано, что поправка к расчетной формуле суммарной проводимости магнитных потоков составляет: $-0,077\mu_0$. Однако, обоснование указанной поправки, проведено в [2] на основе использования строгого аналитического выражения для проводимости потоков выпучивания между открытыми полюсами, что, учитывая закрытый характер области обмоточного окна, очевидно, не соответствует рассматриваемому случаю. В этой связи, возникает вопрос, о влиянии второго граничного условия на результаты расчетов магнитных потоков и их проводимостей в области обмоточного окна плоскопараллельного электромагнита.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Соответственно изложенному выше, целью данной работы является исследовать погрешность, вносимую допущением о том, что индукция магнитного поля на поверхности обмотки, не закрытой железом, направлена вдоль оси катушки и имеет постоянное значение. Согласно [2], это допущение обусловлено однородностью магнитного поля в зазоре, связанной с равномерным распределением скалярного магнитного потенциала по длине воздушного зазора (в направлении x рис. 1, 2). Очевидно, что в общем случае на линии "обмотка-зазор" (линия EF рис. 2) будет иметь

место нормальная составляющая вектора магнитной индукции не равная нулю.

Именно наличие этой составляющей и обуславливает исследуемую погрешность, связанную с наличием магнитного потока из области зазором в области обмоточного окна.

Заметим что при симметричном зазоре ($\delta = b - 2c$, рис. 2) суммарный магнитный поток из области зазора в область обмоточного окна равен нулю в силу симметрии распределения векторного потенциала на линии DC (рис. 2) в этом случае [1].

В случае же несимметричного зазора магнитный поток из области зазора в область обмоточного окна не равен нулю. Его определение по известному распределению векторного потенциала, как показано в [3], дает результаты, практически совпадающие с результатами вычислительного эксперимента, осуществленного с помощью программного продукта FEMM [4, 5], для плоскопараллельного электромагнита с учетом его геометрии (рис. 1). При этом в [3] показано, что для магнитных потоков в железных участках ограничивающих обмоточное окно (участки DE , FC , CB , AB , AD на рис. 2), их расчет на основе использования аналитического выражения для векторного потенциала практически совпадает с результатами вычислительного эксперимента для полной модели плоскопараллельного электромагнита (рис. 1). Такое совпадение свидетельствует, что допущение о постоянстве касательной составляющей индукции на поверхности обмотки в области зазора, является вполне допустимым и не требует полной компенсации потока из зазора в окно, как это предлагается делать в [1].

Как следствие, вопрос о погрешности, вносимой рассматриваемым допущением должен решаться лишь для потока из зазора в окно, наличие которого может влиять на общую проводимость потока рассеяния. В данной работе предлагается решать этот вопрос сравнением аналитических результатов расчетов потока из зазора в окно при равных соотношениях размеров с результатами эксперимента (вычислительного), в котором область обмоточного окна и зазора связаны между собой непосредственно. В этой связи, заметим, что сравнение аналитических расчетов с использованием векторного потенциала, с расчетами по известному методу Ротерса, как это сделано в [1], не является корректным, поскольку сам метод Ротерса является приближенным.

Поскольку влияние рассматриваемого граничного условия на результаты расчетов потока из зазора в обмоточное окно можно исследовать и на симметричном зазоре (при этом, конечно, в силу симметрии следует рассматривать лишь половину зазора), то задачу работы можно сформулировать следующим образом:

- аналитическое определение магнитного потока из зазора в окно (для половины зазора);

- сравнение результатов расчетов по полученному выражению для разных размеров обмоточного окна с результатами вычислительного эксперимента для полной модели рассматриваемого плоскопараллельного электромагнита при тех же соотношениях обмоточного окна;

- определения необходимой коррекции полученного аналитического выражения.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ОБЛАСТИ ОБМОТОЧНОГО ОКНА

Согласно тому, что изложено выше, рассматриваем плоскопараллельный электромагнит с симметричным зазором (рис. 3), для которого распределение векторного потенциала $A_z(x, y)$ в области обмоточного окна ($0 \leq x \leq b$; $0 \leq y \leq a$) при указанных выше допущениях определяется с точностью до константы выражением вида [3] (здесь j – плотность тока в обмотке; μ_0 – магнитная постоянная):

$$A_z(x, y) = -0.5\mu_0 j y^2 - 2\mu_0 j \frac{ab^2}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} (n\pi)^{-2} \cos\left(n\pi \frac{x}{b}\right) ch\left(n\pi \frac{y}{b}\right) \times sh^{-1}\left(n\pi \frac{a}{b}\right) \left[\sin\left(n\pi \frac{c+\delta}{b}\right) - \sin\left(n\pi \frac{c}{b}\right) \right]. \quad (1)$$

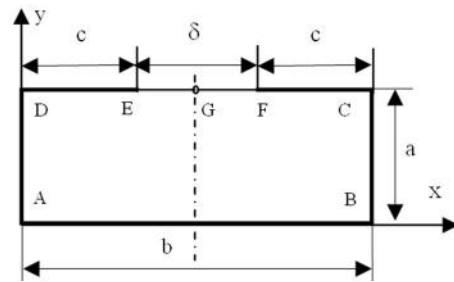


Рис. 3. Модель зоны обмоточного окна плоскопараллельного электромагнита с симметричным зазором

Используя (1) несложно получить аналитическое выражение для искомого магнитного потока из зазора в окно (т.е. потока $\Phi_{\delta/2}$ через линию EG , рис. 3). А именно, для удельного значения потока (равно разности значений векторного потенциала в точках E и G [6]) $\Phi_{\delta/2} = A_z(c, a) - A_z(c + 0.5\delta, a)$ с учетом (1), можно записать следующее выражение

$$\Phi_{\delta/2} = 2\mu_0 j_z \frac{ab^2}{\delta} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\left(n\pi \frac{c+0.5\delta}{b}\right) - \cos\left(n\pi \frac{c}{b}\right)}{(n\pi)^2} \times \frac{ch(n\pi a/b)}{sh(n\pi a/b)} \left[\sin\left(n\pi \frac{c+\delta}{b}\right) - \sin\left(n\pi \frac{c}{b}\right) \right]. \quad (2)$$

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТА ПОТОКА $\Phi_{\delta/2}$ С ДАННЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Вычислительный эксперимент проводился с применением программного продукта FEMM для плоскопараллельного электромагнита, эскиз которого представлен на рис. 4. При этом и для вычислений по формуле (2) и для компьютерного эксперимента брались следующие соотношения размеров: $b = 100$ мм; $a/b = 0,25-1$; $\delta/b = 0-1$.

Значение плотности тока принималось равным $j = 1$ А/мм²; магнитная проницаемость материала магнитопровода электромагнита принималась равной

$10^5 \mu_0$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), чтобы смоделировать ненасыщенное магнитное состояние полюсов при бесконечной магнитной проницаемости их материала.

Отметим, что возможности программного продукта FEMM позволяют определять магнитные потоки с любой выделенной плоскости (линия на плоскости экрана) [5]. Причем, чтобы получить удельное значение магнитного потока результат расчета по FEMM необходимо делить на задаваемую единицу длины.

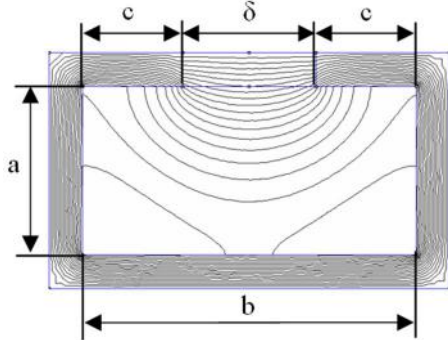


Рис. 4. Эскиз модели электромагнита в программе FEMM

Результаты проведенных расчетов удельного значения (на единицу длины электромагнита) потока $\Phi_{\delta/2}$ (10^{-4} Вб/м) для принятых отношения параметров электромагнита представлены в табл. 1.

Таблица 1

δ/b	a/b					
	0,25		0,5		1	
	Расчет $\Phi_{\delta/2}$, 10^{-4} Вб/м					
	по FEMM	по (2)	по FEMM	по (2)	по FEMM	по (2)
0,1	3,88	6,99	7,85	13,6	15,4	29,5
0,2	3,97	6,93	7,80	13,7	15,6	26,2
0,3	3,96	6,89	7,60	13,1	15,5	26,2
0,4	3,80	6,72	7,26	12,5	14,2	25,3
0,5	3,51	6,41	6,64	11,7	13,1	23,2
0,6	3,16	5,89	5,88	10,6	11,5	21,1
0,7	2,62	5,12	4,88	9,20	9,80	18,4
0,8	2,01	4,05	3,82	7,40	7,59	14,7
0,9	1,25	2,59	2,43	4,80	4,85	9,53
1	0	0	0	0	0	0

Как видно из полученных результатов (табл. 1), расчет потока $\Phi_{\delta/2}$, в самом деле, дает существенную погрешность, которая практически не изменяется во всем диапазоне возможных значений зазоров ($0 \leq \delta \leq b$). Целью дальнейшего было осуществить коррекцию этой погрешности, которая заметит будет тем меньше влиять на общий поток рассеивания через обмоточное окно, тем меньшую долю в этом суммарном потоке будет составлять поток $\Phi_{\delta/2}$.

КОРРЕКЦИЯ РАСЧЕТНОГО ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ПОТОКА $\Phi_{\delta/2}$

Относительно данных, приведенных в табл. 1, можно заметить, что отношение данных, полученных расчетом по (2), к данным, полученным при компьютерном расчете (FEMM), приблизительно постоянно, как это видно из данных (табл. 2), в которой приведе-

но указанное отношение для соответствующих соотношений размеров обмоточного окна.

Таблица 2

δ/b	a/b		
	0,25	0,5	1
0,1	1,80	1,66	1,92
0,2	1,75	1,75	1,68
0,3	1,74	1,73	1,74
0,4	1,77	1,72	1,78
0,5	1,83	1,77	1,77
0,6	1,86	1,81	1,83
0,7	1,95	1,89	1,88
0,8	2,03	1,93	1,93
0,9	2,06	1,99	1,99

Как следствие, несложно заметить, что требуемую коррекцию расчетного выражения (2) можно осуществить простым делением этого выражения на корректирующий коэффициент k , равный среднему арифметическому числовых значений приведенных в табл. 2. Соответствующий расчет дает для указанного коэффициента значение $k = 1,8$.

На рис. 5 приведены результаты расчетов удельного потока $\Phi_{\delta/2}$ с указанной коррективкой. На этом же рисунке приведены графические результаты расчета $\Phi_{\delta/2}$ с помощью программного продукта FEMM. Как видно, сравнение этих результатов позволяет сделать вывод о том, что предлагаемая коррекция является достаточной.

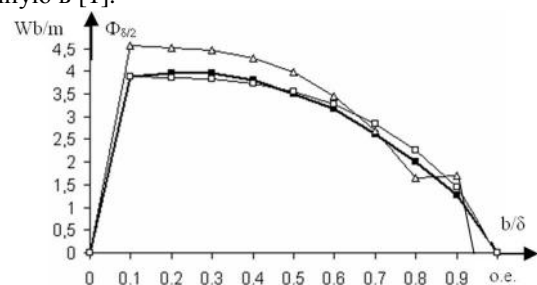
На рис. 5, кроме указанных результатов расчетов, приведены результат расчета потока $\Phi_{\delta/2}$ по (2) с коррекцией значения этого потока по рекомендации из [1], заключающийся в уменьшении расчетного значения потока $\Phi_{\delta/2}$ по (2) на величину

$$-0,077\mu_0 \cdot jab. \quad (3)$$

Выражение (3) получено умножением на магнитодвижущую силу обмотки (jab) на величину корректирующей проводимости для потоков рассеяния в обмоточном окне, полученную в [1].

В связи с этой коррекцией заметим, что она не зависит от зазора и может приводить к отрицательному значению потока $\Phi_{\delta/2}$, как это видно, из соответствующих графиков на рис. 5.

Что же касается предлагаемой коррекции с помощью $k = 1,8$, то она приемлема на всем возможном диапазоне изменения зазора для широкого диапазона изменения соотношения размеров обмоточного окна a/b . Это решает задачу определения практического метода расчета поля рассеяния при $a/\delta < 3$, поставленную в [1].



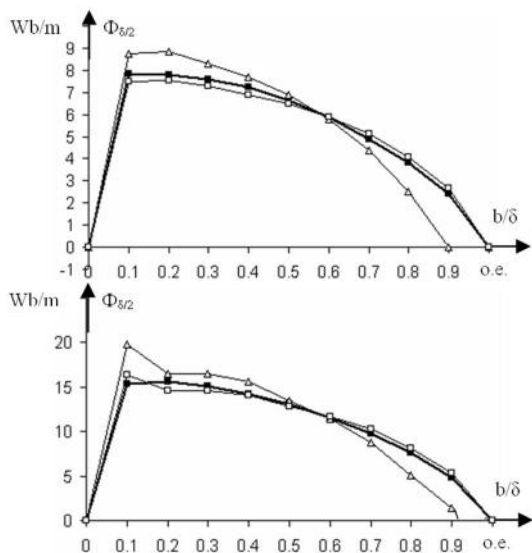


Рис. 5. Расчет потока $\Phi_{\delta/2}$: Δ – по формуле (2) с коррекцией по (3); \blacksquare – компьютерный расчет с применением программного продукта FEMM; \circ – по формуле (2) с коррекцией на коэффициент $k = 1,8$

ВЫВОДЫ

1. Расчет магнитного потока рассеяния из зазора в обмоточное окно плоскопараллельного электромагнита по известному распределению векторного потенциала в области обмоточного окна, полученному при допущении о равномерном распределении скалярного потенциала в зазоре, дает завышенное значение этого потока.

2. Отмеченное завышение имеет практически регулярный характер, что позволяет достаточно точно определять магнитный поток рассеяния из зазора в обмоточное окно на всем диапазоне изменения отношения его размеров, если уменьшать в 1,8 раза расчетный результат, получаемый при использовании известного аналитического выражения для векторного потенциала в рассматриваемом случае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долинский Ю.М. К расчету втяжных электромагнитов / Ю.М. Долинский // Вестник ХПИ. – 1968. – № 28(76). – С. 56-62.
2. Бранспиз Ю.А. Расчет векторного потенциала в обмоточном окне плоскопараллельного электромагнита с несимметричным зазором / Ю.А. Бранспиз, А.А. Вельченко // Техническая электродинамика: Тем. выпуск "Проблемы современной электроники". – 2010. – Ч. 1. – С. 21-24.

3. Загирняк М.В. Исследования распределения магнитных потоков в обмоточном окне плоскопараллельного электромагнита / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз, А.А. Вельченко // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – Вип. 2/2011 (14) – С. 116-120.
4. Meeker D. Finite element method magnetics: User's manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://femm.berlios.de>.
5. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: Изд. центр "Академия", 2005. – 336 с.
6. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. В 2-х т. Т. 2 / Л.Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

Bibliography (transliterated): 1. Dolinskij Yu.M. K raschetu vtyazhnyh `elektromagnitov / Yu.M. Dolinskij // Vestnik HPI. - 1968. - № 28(76). - S. 56-62. 2. Branspiz Yu.A. Raschet vektornogo potenciala v obmotochnom okne ploskoparallel'nogo `elektromagnita s nesimmetrichnym zazorom / Yu.A. Branspiz, A.A. Vel'chenko // Tehnicheskaya `elektrodinamika: Tem. vypusk "Problemy sovremennoj `elektroniki". - 2010. - Ch. 1. - S. 21-24. 3. Zagirnyak M.V. Issledovaniya raspredeleniya magnitnyh potokov v obmotochnom okne ploskoparallel'nogo `elektromagnita / M.V. Zagirnyak, Yu.A. Branspiz, A.A. Vel'chenko // Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi. - 2011. - Vip. 2/2011 (14) - S. 116-120. 4. Meeker D. Finite element method magnetics: User's manual [Elektronnyj resurs]. - Rezhim dostupa: <http://femm.berlios.de>. 5. Bul' O.B. Metody rascheta magnitnyh sistem `elektricheskikh apparatov: Magnitnye cepi, polya i programma FEMM. - M.: Izd. centr "Akademiya", 2005. - 336 s. 6. Nejman L.R. Teoreticheskie osnovy `elektrotehniki. V 2-h t. T. 2./ L.R. Nejman, K. S. Demirchyan. - L.: `Energoizdat, 1981. - 416 s.

Поступила 20.09.2011

Бранспиз Юрий Адольфович, д.т.н, проф.,

Вельченко Анна Александровна

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля
кафедра "Прикладная физика"
91034, Луганск, кв. Молодежный, 20-а
тел. (0642) 500829, e-mail: branspiz@mail.ru

Branspiz Yu.A., Velchenko A.A.

Verification of boundary conditions adequacy on the gap line in calculating a vector potential in parallel-plane electromagnet window space.

A parallel- plane electromagnet with a known analytical expression for vector potential distribution in the window space is considered. With this expression application, adequate calculation possibilities for the gap - window space magnetic flux are analyzed. It is shown that the assumption of the gap uniform field requires correcting of the corresponding expression. The corrective coefficient is specified through direct estimation.

Key words – **electromagnet, window space, vector potential, adequate calculation.**

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Розроблено польову математичну модель і досліджено розподіл електромагнітного поля в активній зоні компенсованого асинхронного двигуна. Обґрунтовано фундаментальну умову внутрішньої ємнісної компенсації, якої слід дотримуватися при створенні компенсованих асинхронних двигунів.

Разработана полевая математическая модель и исследовано распределения электромагнитного поля в активной зоне компенсированного асинхронного двигателя. Обосновано фундаментальное условие оптимальной внутренней емкостной компенсации, которого нужно придерживаться при создании компенсированных асинхронных двигателей.

ВСТУП

Трифазний асинхронний двигун (АД), що складає основу електроприводу робочих машин, характеризується високими номінальними енергетичними показниками. Проте внаслідок технологічних похибок при виготовленні та важких умов експлуатації реальні енергетичні показники АД значно відрізняються від паспортних даних, що збільшує витрати електроенергії та знижує енергоефективність споживачів. Тому актуальним є вирішення проблеми підвищення енергетичних показників АД, зокрема його коефіцієнта потужності. Одним з ефективних методів розв'язання зазначеної проблеми є застосування внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності [2-4].

Внутрішня ємнісна компенсація реактивної потужності в асинхронному двигуні здійснюється шляхом поділу кожної фази обмотки статора на дві частини, які просторово зміщені між собою в пазах осердя статора на заданий кут θ і з'єднані за схемою поворотного автотрансформатора (АТ) на електричну ємність (рис. 1,а). Такі АД, виконані на базі серійних, називаються компенсованими АД (КАД). Кількість витків полуфаз статора, переріз їх проводу, кут просторового зміщення між ними можуть бути довільними ($\theta = 0 \dots 2\pi$). Але із умови технологічності і забезпечення ефективної роботи КАД цей кут доцільно обрати рівним 30° шляхом поділу фазної зони 60° обмотки статора серійного АД на дві рівні (однакові за кількістю витків) частини. Одна з полуфаз приймається за основну робочу обмотку статора і є первинною обмоткою АТ із увімкненням її на напругу мережі живлення, друга додаткова полуфаза статора або вторинна обмотка АТ зміщена відносно первинної на кут 30° проти напрямку обертання поля в двигуні.

При живленні обмотки статора за схемою КАД в окремих полуфазах можуть протікати різні струми, що призводить до зміни розподілу електромагнітного поля в активній зоні КАД. Тому при розробці КАД необхідно дослідити особливості розподілу поля та визначити умови, при яких цей розподіл є оптимальним. Метою статті є розробка польової математичної моделі КАД, аналіз його електромагнітного поля та визначення умов оптимальної компенсації.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Аналіз електромагнітного поля в активній зоні КАД виконується у двовимірному наближенні. Розрахунковою зоною є поперечний переріз двигуна. Ана-

лізуються сталі електромагнітні поля при синусоїдальній зміні у часі всіх величин. Рівняння для розрахунку розподілу аксіальної просторової складової комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу \dot{A}_z в роторній системі координат має наступний вигляд [1]:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} - j\omega_1 s \mu \gamma \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{z\text{стор}}, \quad (1)$$

де ω_1 – кутова частота обертання поля статора, S – ковзання ротора, μ , γ – магнітна проникність і електропровідність середовища; $\dot{J}_{z\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів.

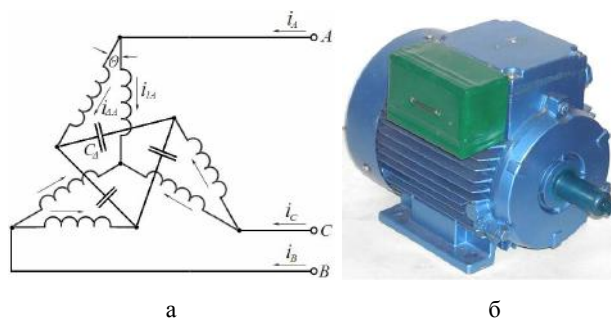


Рис. 1. Схема обмоток статора (а) та зовнішній вигляд (б) компенсованого асинхронного двигуна

Рівняння (1) доповнюється однорідною граничною умовою першого роду на поверхні ярма статора G

$$\dot{A}_z \Big|_G = 0 \quad (2)$$

Електромагнітне поле аналізується з урахуванням нелінійних залежностей магнітної проникності феромагнітної сталі осердя двигуна μ від магнітної індукції. Джерелами поля є густини сторонніх струмів в пазах статора, в яких укладено три фази обмотки статора. Наприклад, для некомпенсованих АД, в яких в межах кожної фазної зони протікає однаковий струм, маємо:

$$\begin{aligned} \dot{J}_{A\text{стор}} &= I_m / S_{II}, \\ \dot{J}_{B\text{стор}} &= -I_m [\cos(-2\pi/3) - j \sin(-2\pi/3)] / S_{II}, \\ \dot{J}_{C\text{стор}} &= -I_m [\cos(-4\pi/3) - j \sin(-4\pi/3)] / S_{II}, \end{aligned} \quad (3)$$

де I_m – амплітуда струму в фазі статора; S_{II} – площа перетину паза статора.

В компенсованих АД струми обмотки статора також задаються за формулами, ідентичними формулам (3). Але при цьому необхідно задати різні значення струмів в окремих полуфазах. Наприклад, якщо q котушок в кожній фазній зоні розділено на дві однакові групи, то в $q/2$ пазах статора, де лежить одна половина сторін котушок даної фазної зони, задається амплітуда струму I_{m1} , а в інших $q/2$ пазах статора – задається інша амплітуда струму I_{m2} , яка визначається схемою компенсації та режимом роботи КАД.

Струми в пазах з обмоткою ротора обчислюються "автоматично" в процесі розв'язання рівняння (1). В пазах ротора задається електропровідність матеріалу, що відповідає матеріалу стержнів короткозамкненої обмотки ротора (мідь, алюміній) і струми ротора індукуються при протіканні електромагнітного процесу. Такий підхід дозволяє також врахувати нерівномірність розподілу струму ротора уздовж висоти пазу, яка обумовлена поверхневим ефектом в електропровідних середовищах.

Після розв'язання рівняння (1) з урахуванням умов (2), (3) складові магнітної індукції в декартових координатах знаходяться по наступним виразам:

$$\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y, \dot{B}_y = -\partial \dot{A}_z / \partial x. \quad (4)$$

Для аналізу магнітного поля в повітряному проміжку двигуна використовується нормальна складова магнітної індукції – просторова складова індукції, що направлена уздовж вектора нормалі до розрахункової лінії, яка проходить уздовж середини висоти повітряного проміжку. Нормальна складова індукції обумовлює величину магнітного потоку взаємодії між обмотками статора і ротора і знаходиться за відомими

складовими \dot{B}_x, \dot{B}_y по наступному виразу:

$$\dot{B}_n = (x \dot{B}_x + y \dot{B}_y) / R_\delta, \quad (5)$$

де x, y – координати точки на розрахунковій лінії, що розташована в повітряному проміжку, R_δ – радіус розрахункової лінії. Сформульована математична модель (1) – (5) дозволяє проаналізувати розподіл електромагнітного поля КАД для різних схем підключення компенсуючих конденсаторів до обмотки статора та для різних режимів роботи. Для чисельної реалізації моделі використовувався метод скінченних елементів [5].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Приведемо окремі розрахункові результати на прикладі серійного АД типу АИР71В2, що був модернізований з використанням внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності. Двигун має наступні вихідні дані: потужність $P_2 = 1,1$ кВт; номінальний фазний струм обмотки статора $I_{1N} = 2,6$ А; число пар полюсів $p = 1$; кількість пазів статора і ротора $Z_1 = 24, Z_2 = 20$; внутрішній діаметр осердя статора $D_1 = 65$ мм; зовнішній діаметр осердя статора $D_a = 116$ мм; висота повітряного проміжку $\delta = 0,35$ мм. Відкриття пазів статора $b_{m1} = 2$ мм, пази ротора закриті. Обмотка статора – одношарова концентрична. Число

пазів на полюс і фазу складає $q = 4$.

Проведемо порівняльний аналіз характеристик електромагнітного поля зазначеного вище серійного АД і створеного на його основі КАД. Використаємо наведену на рис. 1,а схему компенсації, в якій кожна фаза трифазної обмотки статора розподіляється на дві однакові полуфази, які з'єднуються паралельно, причому в одну з полуфаз послідовно до її витків включається компенсуючий конденсатор [2]. Будемо називати першу з полуфаз *робочою*, а ту, в яку включений конденсатор – *компенсованою* полуфазою. Кількість фазних зон в КАД за такою схемою компенсації збільшується удвічі: з 6-ти (як у серійному АД) до 12-ти, причому кожна фазна зона містить по дві котушки ($q = 2$) і її вісь зсунута у просторі до вісі іншої фазної зони на кут $\alpha = -30^\circ$.

Кут фазового зсуву δ між струмами в робочій I_{1P} і компенсованій I_{1K} полуфазах можна отримати різним за рахунок вибору співвідношення індуктивності полуфази обмотки статора і ємності конденсатора. В роботі [2] пропонується обирати такі параметри КАД, щоби виконувалася умова *оптимальної компенсації*

$$\alpha + \delta = 0, \quad (6)$$

при якій струм намагнічування двигуна є мінімальним. Для перевірки зазначеної умови виберемо таку величину ємності конденсатора, щоби кут фазового зсуву між струмами полуфаз дорівнював $\delta = 30^\circ$. Згідно з даними роботи [2] для підвищення $\cos\phi$ серійного АД з зазначеними вище параметрами від 0,8 до 0,95 при виборі оптимальної ємності компенсуючого конденсатора (для даного двигуна це $C = 15$ мкФ) струм в компенсованій полуфазі I_{1K} повинен приблизно в 1,25 рази перевищувати струм I_{1P} в робочій (некомпенсованій) полуфазі обмотки статора. Як показують дослідження, зазначене оптимальне співвідношення між струмами полуфаз є притаманним і для інших варіантів КАД і забезпечує найкращі енергетичні характеристики компенсованого АД.

Додатковою умовою, яку приймається при порівнянні АД і КАД, є однаковість сумарних теплових втрат в обмотках статорів цих двигунів, що при інших рівних умовах (незмінність умов вентиляції) забезпечує однаковість середнього перегріву витків обмоток. Струм в кожній полуфазі серійного АД при двох паралельних гілках обмотки статора дорівнює $I_{1N/2} = I_{1N}/2 = 1,3$ А (діюче значення). Прирівнюючи сумарні втрати в обмотці статора серійного АД до сумарних втрат в обмотці статора КАД, отримаємо наступне рівняння для визначення струму в I_{1P} в робочій полуфазі:

$$2I_{1N/2}^2 \cdot r_1 = I_{1P}^2 \cdot r_1 + (1,25 \cdot I_{1P})^2 \cdot r_1, \quad (7)$$

де r_1 – активний опір однієї полуфази.

Після розв'язання рівняння (7) отримаємо, що при незмінності сумарних теплових втрат в обмотках статора серійного АД і КАД струм в робочій полуфазі КАД повинен дорівнювати $I_{1P} = 0,884 I_{1N/2} = 1,15$ А, а струм в компенсованій полуфазі повинен дорівнювати $I_{1K} = 1,105 I_{1N/2} = 1,437$ А. Таким чином, незважаючи на те, що струм в компенсованій полуфазі перевищує номінальний струм серійного АД, сумарні теплові втрати в обмотці статора залишаються незмінними.

Прийнявши магніторушійну силу (МРС) одного пазу, в якому містяться витки зі струмом I_{IN2} , за одну відносну одиницю, побудуємо криві МРС обмоток статора уздовж довжини повітряного проміжку для серійного АД і КАД. Ці криві зображено на рис. 2, де позначено також фазні зони обмотки статора. Фазні зони, які позначені літерою з дефісом, відносяться до шунтованої полуфази. Для серійного АД фазні зони, позначені однією літерою, наприклад, А і А', створюють єдину фазну зону.

З рис. 2 видно, що амплітуда МРС серійного АД на 8 % перевищує амплітуду МРС КАД. При цьому, обмотувальний коефіцієнт першої гармоніки серійного АД складає $k_{ob1} = 0,957$, а відповідно обмотувальний коефіцієнт першої гармоніки КАД складає $k_{ob1} = 0,924$. Тобто при однаковому магнітному потоку взаємодукації величина ЕРС першої гармоніки в КАД зменшиться усього на 3,5 %. Але з іншого боку форма кривої МРС КАД є більш наближеною до синусоїдальної, тобто містить в собі менші за амплітудою вищі гармоніки магнітного поля. Наприклад, якщо в серійному АД обмотувальні коефіцієнти для 5-ї і 7-ї гармонік складають відповідно $k_{ob5} = 0,205$ і $k_{ob7} = 0,157$, то в компенсованому АД ці коефіцієнти зменшуються відповідно до значень $k_{ob5} = 0,053$ і $k_{ob7} = 0,04$. Враховуючи малу висоту повітряного проміжку двигуна (0,35 мм) таке зменшення амплітуд вищих гармонік є дуже позитивним, оскільки призводить до суттєвого зменшення додаткових втрат в двигуні. Таким чином при дотриманні визначених вище умов оптимальної компенсації КАД характеризується не тільки суттєво збільшеним коефіцієнтом потужності, але й підвищеним ККД.

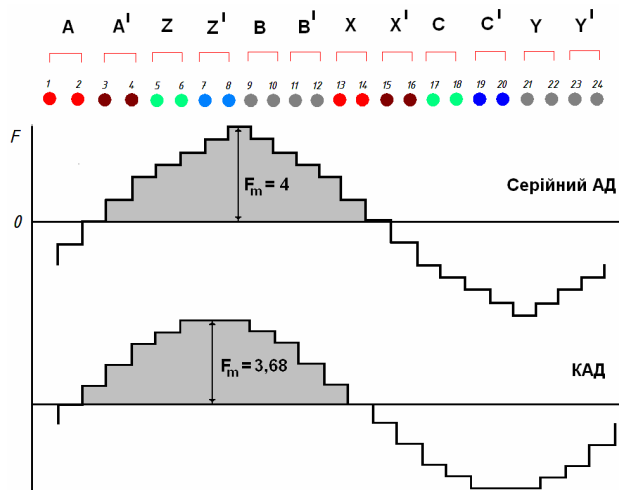


Рис. 2. Криві МРС статора серійного АД і КАД

На рис. 3 зображено розподіл поля магнітної індукції в активній зоні КАД. Рівні індукції на окремих ділянках активної зони відповідають фоновому зафарбленню у відповідності до наведеної поруч шкали.

На рис. 4 зображено криві розподілу нормальної складової магнітної індукції у повітряному проміжку, яка створює магнітний потік взаємодукації між статором і ротором. На рис. 4,а показано криву розподілу магнітної індукції серійного АД, а на рис. 4,б – компенсованого двигуна при дотриманні зазначених умов оптимальної компенсації (б).

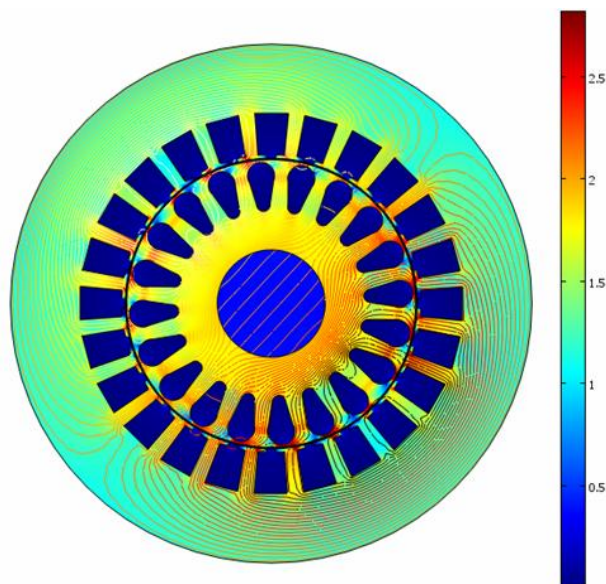


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції в активній зоні КАД

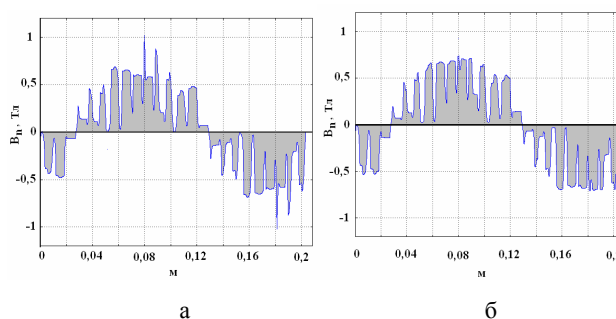


Рис. 4. Розподіл нормальної складової магнітної індукції в повітряному проміжку: а – серійного АД; б – КАД

Порівняльний аналіз наведених кривих дозволяє зробити наступні висновки. В наведених кривих індукції суттєво виражені зубцеві гармоніки, які на окремих ділянках повітряного проміжку створюють перепад індукції вище ніж 0,5 Тл. Зазначені перепади виникають при таких взаємних положеннях статора і ротора, при яких зубці статора розташовуються навпроти зубців ротора.

Такий результат цілком узгоджується з наведеними на рис. 2 кривими МРС і пов'язаний зі збільшенням кількості фазних зон обмотки статора в КАД з шести до дванадцяти.

Таким чином модернізація АД за технологією КАД при умовах оптимальної компенсації покращує форму кривої розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку, що у цілому сприяє зниженню додаткових втрат потужності та підвищенню енергетичних показників асинхронного двигуна. Слід підкреслити, що, у випадках значного недотримання умов оптимальної компенсації (б) спостерігається різке спотворення магнітного поля у повітряному проміжку.

ВИСНОВКИ

1. Проведені дослідження електромагнітного поля КАД показали, що фундаментальною умовою оптимальної компенсації, яку необхідно дотримуватися при створенні компенсованих за реактивною потужністю асинхронних двигунів є умова $\alpha + \delta = 0$, де α – кут

просторового зсуву осей фазних зон полуфаз обмотки статора, δ – кут фазового зсуву між електричними струмами в полуфазах. Недотримання і суттєве відхилення від цієї умови призводить до спотворення електромагнітного поля і енергетичних характеристик КАД.

2. Показано, що при умові оптимальної компенсації магнітне поле в КАД має кращі характеристики, ніж в серійному двигуні, обраному за прототип. Зокрема крива магніторухливної сили обмотки статора уздовж довжини повітряного проміжку в КАД більш наближена до синусоїдальної, а значення обмотувальних коефіцієнтів для найбільш суттєвих 5-ї і 7-ї гармонік зменшені в 3,5...4 рази у порівнянні з серійним двигуном-прототипом.

3. Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку має менші зубцеві гармоніки і, як наслідок в двигуні виникають менші додаткові втрати потужності. Таким чином модернізація АД за технологією КАД при умовах оптимальної компенсації дозволяє не тільки суттєво підвищити коефіцієнт потужності двигуна, але й сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії асинхронного двигуна.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – Київ, НТУУ "КПІ", 2007. – 191 с.
2. Мишин В.И., Лут Н.Т. Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулирующими характеристиками // Вісник НТУ "ХПІ". – 2001. – № 17. – С. 110-112.
3. Мишин В.И., Чуенко Р.Н., Кулинич А.Н. Принципы расчета характеристик в асимметричных режимах компенсированного асинхронного двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С. 36-41.
4. Мишин В.И., Чуенко Р.Н. Методика расчета характеристик обобщенного компенсированного асинхронного электродвигателя // Вісник НТУ "ХПІ". – 2007. – № 55. – С. 83-85.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. – 392 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vas'kovskij Yu.M. Pol'ovij analiz elektrichnih mashin. - Kіiv, NTUU "KPI", 2007. - 191 s. 2. Mishin V.I., Lut N.T. Asinhronnye `elektrodvigateli s uluchshennymi `energeticheskimi i puskoregulirovochnymi harakteristikami // Visnik NTU "HPI". - 2001. - № 17. - S. 110-112. 3. Mishin V.I., Chuenko R.N., Kulinich A.N. Principy rascheta harakteristik v asimmetrichnyh rezhimah kompensirovannogo asinhronnogo dvigatelya // Elektrotehnika i elektromehhanika. - 2006. - № 1. - S. 36-41. 4. Mishin V.I., Chuenko R.N. Metodika rascheta harakteristik obobschennogo kompensirovannogo asinhronnogo `elektrodvigatelya // Visnik NTU "HPI". - 2007. - № 55. - S. 83-85. 5. Segerlind L. Primenenie metoda konechnyh `elementov. M.: Mir, 1979. - 392 s.

Надійшла 22.12.2011

Васьковський Юрій Миколайович, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"
кафедра електромеханіки
03056, Київ, пр. Перемоги, 37
тел. (044) 4549518, e-mail: vun157@voliacable.com

Чуенко Роман Миколайович, к.т.н., доц.

Національний університет біоресурсів і природокористування
кафедра електричних машин і експлуатації електрообладнання
03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 12
тел. (044) 5288755, e-mail: roman_chuenko@ukr.net

Vas'kovsky Y.N., Chuenko R.M.

Mathematical modelling of electromagnetic field in a compensated induction motor.

A field mathematical model is developed, electromagnetic field distribution in the active zone of a compensated asynchronous motor investigated. the fundamental condition of optimal internal capacitive compensation is validated to follow at compensated induction motor designing.

Key words – Compensated induction motor, mathematical model, field analysis.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ И РАДИАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ НА ЯКОРЕ

Представлено результати експериментальних досліджень розподілу електромагнітної індукції у повітряному зазорі коаксіально-лінійного синхронного двигуна зворотньо-поступального руху в межах половини полюсного поділу з аксіальним та радіальним розташуванням постійних магнітів на якорі.

Представлены результаты экспериментальных исследований распределения магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя возвратно – поступательного движения в пределах половины полюсного деления с аксиальным и радиальным расположением постоянных магнитов на якоре.

ВВЕДЕНИЕ

Применение вибрационных машин в строительном производстве [1] и других технологических процессах, связанных с перемещением, уплотнением, разрушением и так далее является актуальным. Чаще всего в качестве возбудителя колебаний рабочего органа используются асинхронные двигатели с дебалансными системами возмущающих усилий. Эти двигатели с дебалансным расположением возмущающих усилий имеют такие недостатки, как: малую надежность работы вибраторов, большую энергоемкость, недостаточную эргономичность и автоматизацию систем управления.

В работе [2] предложены вибраторы, приводом рабочего органа которых является коаксиально-линейный синхронный двигатель с постоянными магнитами (NdFeB N44 $B = 1.2$ Тл $\varnothing 50 \times 20h14$, Китай), аксиально расположенными на якоре (КЛСД-ПМ-А) (рис. 1,а). Предложенная конструкция вибраторов КЛСД-ПМ-А позволяет частично исключить перечисленные недостатки существующих вибрационных машин.

В строительном производстве, в частности, при погружении свай, шпунтов и других строительных изделий в грунт, используют вибропогружатели мощностью от 30 до 155 кВт.

Мощность вибропогружателя КЛСД-ПМ-А установки для погружения свай вибростатическим способом составила 4,8 кВт. Проблемой является сложность изготовления вибраторов большой мощности из-за технологического процесса изготовления магнитов тороидального типа большого диаметра.

В данной работе исследуются вибраторы [2, 3], приводом рабочего органа которого является коаксиально-линейный синхронный двигатель с аксиальным КЛСД-ПМ-А и радиальным расположением постоянных магнитов на якоре (КЛСД-ПМ-Р) (рис. 1). Определены средние значения магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и якорем этих двигателей, а также даны их сравнительные характеристики.

Конструктивная особенность КЛСД-ПМ-Р с радиальным расположением постоянных магнитов на якоре (см. рис. 1,б) позволяет увеличить мощность

вибраторов и расширить их применение в различных технологических процессах, где используется вибротехника.

Якорь вибровозбудителя КЛСД-ПМ-А (см. рис. 1,а) и якорь вибровозбудителя КЛСД-ПМ-Р (см. рис. 1,б) состоит из: постоянных магнитов 1; концентраторов магнитных силовых линий, изготовленных из стали (стали 3) 2 и металлического стержня (бронзы) 3.



Рис. 1. Якорь вибровозбудителя КЛСД:
а) КЛСД-ПМ-А; б) КЛСД-ПМ-Р

В работах [4] представлены математические модели, определяющие параметры электромеханических характеристик КЛСД. Однако недостаточно полно отображены результаты экспериментальных исследований распределения магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя как с аксиальным, так и с радиальным расположением постоянных магнитов на якоре. Не даны их сравнительные характеристики по распределению магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и якорем исследуемых двигателей.

Следовательно, целью данной работы является исследование распределения параметров магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя возвратно-поступательного движения с аксиальным и радиальным расположением постоянных магнитов на якоре, а также их сравнительные характеристики.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для проведения экспериментальных исследований коаксиально-линейного синхронного двигателя возвратно-поступательного движения КЛСД-ПМ-А и КЛСД-ПМ-Р разработан стенд (рис. 2). Стенд включает коаксиально-линейный синхронный двигатель 1, где: статор (индуктор) – 2; якорь КЛСД – 3; измерительный прибор магнитной индукции (Ш1-8) – 4 со щупом (датчиком) – 5.

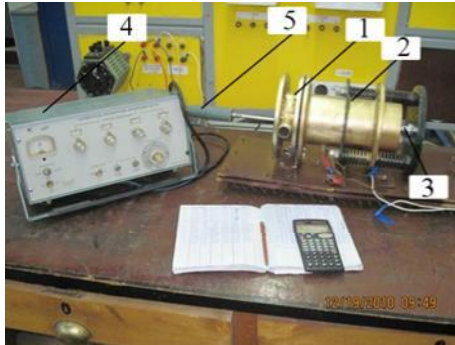


Рис. 2. Стенд для исследования коаксиально-линейного синхронного двигателя

Исследуемый коаксиально-линейный синхронный двигатель (см. рис.2) имеет следующие конструктивные параметры: воздушный зазор между индуктором и якорем составляет 2 мм; немагнитный зазор – 7 мм; толщина магнитопровода индуктора – 10 мм; толщина токового слоя (обмоток) составляет 5 мм.

Магнитопровод КЛСД выполнен из стальной проволоки диаметром 1 мм и уложен поверх токового слоя индуктора толщиной 10 мм; длина активной части магнитопровода составляет 164 мм; активная длина якоря 112 мм; диаметр якоря 60 мм; масса постоянных магнитов составляет 0,51 кг.

Так как при работе КЛСД якорь совершает колебания в пределах полюсного деления, то измерение параметров магнитной индукции также осуществляется в пределах полюсного деления.

Измерение параметров магнитной индукции проводилось в следующей последовательности. При помощи щупа измерительного прибора магнитной индукции измерения проводились с шагом $\Delta x = 2,5$ мм активной части индуктора. Эти измерения проводились при смещении якоря по координате X с шагом 1 мм по отношению к активной зоне индуктора КЛСД 10 мм.

На рис. 3,а представлено схематичное изображение коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным расположением постоянных магнитов на якоре, где: индуктор – 1; магнитопровод индуктора – 2; обмотка индуктора (токовый слой) – 3; постоянные магниты – 4; концентраторы магнитных силовых линий – 5; якорь КЛСД-ПМ-А-6.

На рис. 3,б изображено семейство характеристик распределения параметров магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя $B = f(x)$ в пределах изменения положения якоря по отношению к индуктору на величину половины полюсного деления (а, б).

На рис. 4,а представлено схематичное изображение коаксиально-линейного синхронного двигателя с радиальным расположением постоянных магнитов на якоре, где: индуктор – 1; магнитопровод индуктора – 2;

обмотка индуктора (токовый слой) – 3; постоянные магниты – 4; концентраторы магнитных силовых линий – 5; якорь КЛСД-ПМ-Р-6.

На рис. 4,б изображено семейство характеристик распределения параметров магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя $B = f(x)$ в пределах изменения положения якоря по отношению к индуктору на величину половины полюсного деления (а, б).

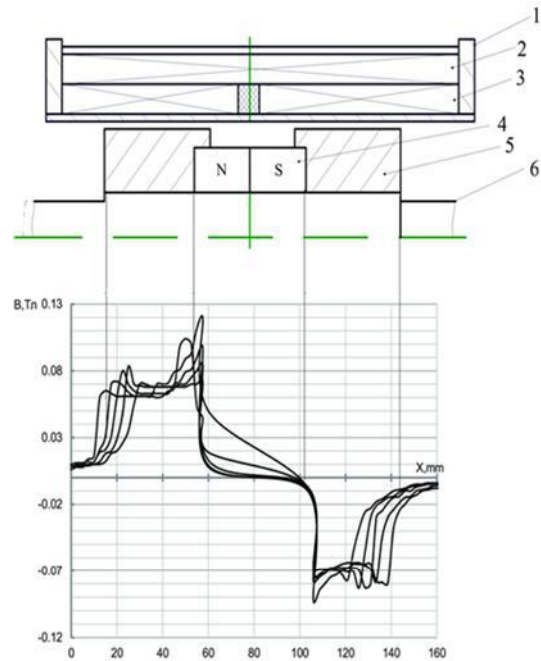


Рис. 3. Схематичное изображение коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным расположением постоянных магнитов на якоре (а) и характер распределения параметров магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя (б)

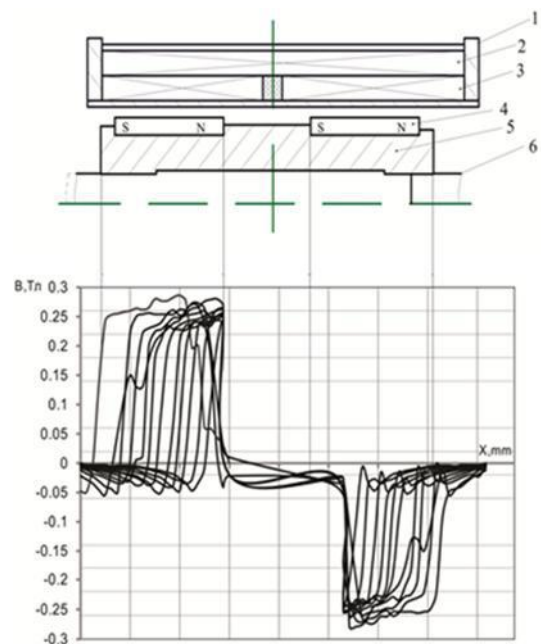


Рис. 4. Схематичное изображение коаксиально-линейного синхронного двигателя с радиальным расположением постоянных магнитов на якоре (а) и характер распределения параметров магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя (б)

По результатам исследования семейства характеристик распределения параметров магнитной индукции в зазоре КЛСД (см. рис. 3, 4) были построены графики (рис. 5), где: а – среднее значение магнитной индукции в зазоре КЛСД с радиальным расположением постоянных магнитов на якоре; б – среднее значение магнитной индукции в зазоре КЛСД с аксиальным расположением постоянных магнитов на якоре.

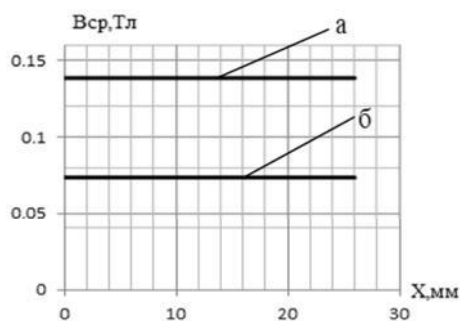


Рис. 5

Среднее значение магнитной индукции определялось по формуле:

$$B_{cp} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{|B_n| + |B_{n+1}|}{2} \times \Delta x}{L}$$

где B_{cp} – среднее значение магнитной индукции, Тл; N – количество измеренных значений параметров индукции в зоне активной части индуктора; B_n – значение магнитной индукции в момент его измерения в заданной точке, Тл; L – длина активной зоны индуктора КЛСД.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате экспериментальных исследований по распределению параметров магнитной индукции в воздушном зазоре КЛСД с аксиальным и радиальным размещением постоянных магнитов на якоре выяснилось, что с радиальным расположением магнитов магнитная индукция в среднем на 40% больше, чем в случае с аксиальным размещением постоянных магнитов на якоре.

Следовательно, при определении механических характеристик, а именно тягового усилия, более эффективным двигателем является КСЛД с радиальным расположением постоянных магнитов на якоре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багрман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: Высш. шк., 1977.
2. Патент на корисну модель №24757 Вибровозбудитель E02D7/10(2007.01).E02D7/18(2007.01).E02D7/20(2007.01). Богазинко М.В., Голенков Г.М., Голубь В.П., Попков В.С., Пархоменко Д.И. видано відповідно до закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі". 10.07.2007.Бюл №10.
3. Патент на винах №93168 лінійний електродвигун зворотно-поступального руху, МПК (2011.01) HD2K33/00 H02K41/025. Богазинко М.В., Голенков Г.М., Голубь В.П., Попков В.С. "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі". 10.01.2011, Бюл №1.
4. Голенков Г.М., Бондарь Р.П., Макогон С.А., Богазинко М.В., Попков В.С. Моделирование работы электрического вибратора с коаксиально-линейным двигателем при разных законах регуляции // Техническая электродинамика. – 2007. – № 2. – С. 54-59.

Bibliography (transliterated): 1. Bagrman V.A., Byhovskij I.I. Vibracionnye mashiny i processy v stroitel'stve. - M.: Vyssh. shk., 1977. 2. Patent na korisnu model' №24757 Vibrovobuditel' E02D7/10(2007.01).E02D7/18(2007.01).E02D7/20(2007.01). Bogazinko M.V., Golenkov G.M, Golub' V.P., Popkov V.S., Parhomenko D.I. vidano vidpovidno do zakonu Ukraїni "Pro ohoronu prav na vinahodi i korisni modeli". 10.07.2007.Byul №10. 3. Patent na vinah №93168 linijnij elektrodvigun zvorotn'o-postupal'nogo ruhu, MPK (2011.01) HD2K33/00 H02K41/025. Bogazinko M.V., Golenkov G.M, Golub' V.P., Popkov V.S. "Pro ohoronu prav na vinahodi i korisni modeli". 10.01.2011, Byul №1. 4. Golenkov G.M., Bondar' R.P., Makogon S.A., Bogazinko M.V., Popkov V.S. Modelirovanie raboty `elektricheskogo vibratora s koaksial'no-linejnym dvigatelem pri raznyh zakonah reguljacii // Tehnicheskaya `elektrodinamika. - 2007. - № 2. - S. 54-59.

Поступила 08.12.2011

Голенков Геннадий Михайлович, к.т.н., доц.,
Аббасян Мохсен
Киевский национальный университет
строительства и архитектуры
03680, Киев, Воздухофлотский проспект, 31
e-mail: mohsen12849@yahoo.com

Golenkov G.M., Abbasian M.

Experimental investigations of electromagnetic induction distribution in the air gap of a coaxial linear synchronous motor with permanent magnets axial and radial location on the armature.

The paper presents results of experimental investigations of electromagnetic induction distribution in the air gap of a coaxial linear synchronous motor with alternate/reciprocal motion within the half polar pitch and with axial and radial location of permanent magnets on the armature.

Key words – electromagnetic induction, coaxial linear synchronous motor, permanent magnet.

TECHNOLOGICAL ADVANCE IN RELAY PROTECTION: DANGEROUS TENDENCIES

Розглядаються сучасні тенденції розвитку релейного захисту: ускладнення, збільшення кількості виконуваних функцій, застосування недетермірованої та вільно-програмованої логіки, використання Ethernet та WiFi каналів зв'язку, зниження надійності. Визначається небезпека існуючих тенденцій розвитку релейного захисту й необхідність створення незалежного від розробників та виробників реле захисту експертної координаційної ради фахівців для вироблення загальної стратегії та шляхів розвитку релейного захисту.

Рассматриваются современные тенденции в развитии релейной защиты: усложнение, увеличение количества выполняемых функций, применение недетерминированной и свободно-программируемой логики, использование Ethernet и Wi-Fi каналов связи, снижение надежности. Отмечается опасность существующих тенденций развития релейной защиты и необходимость создания независимого от разработчиков и производителей реле защиты экспертного координационного Совета специалистов для выработки общей стратегии и путей развития релейной защиты.

1. EXTRUSION INTO THE HISTORICAL DOMAIN

For over a hundred years all the tasks of relay protection have been performed by electromechanical protection relays (EMR). The fact that EMRs are still widely used in many countries, including Russia (about 80-90% of all types of protections), proves that in general EPRs are capable of solving all the present problems of the relay protection. However, during the past 15-20 years there has been a widespread displacement of EMR by microprocessor-based relay protection devices (MPD). MPD and various programmable logic controllers (PLCs) that control the operating modes of electrical equipment, have become an integral part of our lives and, in many cases, there is no other device available to substitute for them to ensure the normal functioning of the power industry. This is not due to some unique features of microprocessor devices, this is rather a result of the costs of the fully automated production of MPD based on printed circuit boards compared to the production of high-precision mechanics for the relays of the previous generation. 30-40 years ago due to the necessity for cutting production costs and improve profitability of production, the development of the new types of EMRs was stopped and all efforts were focused first on the creation of the static solid-state protections, and then on the development of MPDs. The first types of MPD simply copied all the functions and characteristics of the relays of previous generations. New features and capabilities of MPD have been implemented only many years after. This technical policy of manufacturers has resulted in the complete halting of the production of all other types of protection by all of the world's leading manufacturers of the relay protection, and MPDs have become nearly the only available type of protection.

Even the very first MPDs, which simply copied the functions of the static solid-state transistor-based relays, see Fig. 1, revealed serious problems of the MPDs: more frequent failures and irreparability due to the presence of the special microprocessor and non-volatile memory containing the program. As a result, while the relays of type RXIDF-2H built on transistors and other discrete components were quick to repair and return to operation, their microprocessor-based analogue RXIDK-2H must be discarded. Hence, the microprocessor-based RXIDK-2H have long been taken out of service while RXIDF-2H are still used. The tendency of the relay protection reliability weakening associated with the transition to the MPD and noticed at the beginning of this process can be traced so far, despite the fact that modern generation of the MPDs have little in common with the first samples manufactured a few decades ago, see Fig. 1. This goes to prove that the problem is systemic rather than a result of the single technical defects specific to early MPD models. But no one

wanted to gain the character of retrograde and nobody wanted to talk about the obvious problems of MPDs welcomed with such rapturous applause.

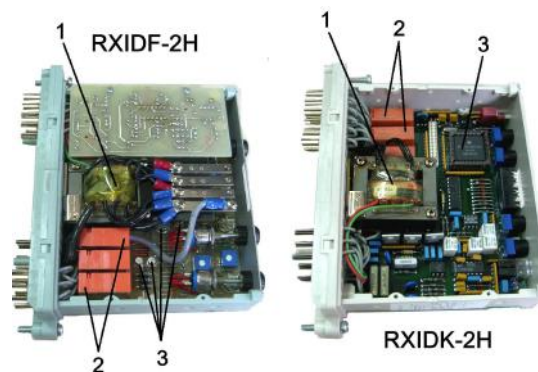


Fig. 1. Two current relays with independent time delay, both with equal technical parameters, dimensions and characteristics made in the identical standard cases COMBIFLEX® manufactured by the same company (ABB), the left – the static solid-state relay RXIDF-2H, the right – microprocessor-based relay RXIDK-2H. 1 – input current transformer; 2 – output electromagnetic relays; 3 – transistors of the static relay and specialized microprocessor of the microprocessor-based one

Moreover, since over the past decades billions of dollars have been invested in the ideas and technologies of the MPDs and as it has become the source of profit for thousands of scientists and engineers all around the world, all discussions about the problems and disadvantages of the MPDs have been nipped in the bud or met with fierce opposition by the representatives of manufacturers, scientists, developers, designers and all other participants of this business.

My past attempts to draw attention to the problems of the MPD [1, 2] caused fierce accusations of incompetence, misunderstanding of the basis of the relay protection, and even of an attempt to slow down the technological progress.

2. ABOUT TECHNOLOGICAL ADVANCE

The cheapness and availability of the highly-integrated microprocessors, industrial controllers and advanced electronic components, a huge and ever expanding range of such components available on the market, extremely high performance of the equipment designed for automatic installation and soldering of the surface mounted components of printed circuit boards, automatic test systems for the ready-made printed boards – all these remove the previous restrictions to the complexity of the electronic systems and their field of application. This is the reason why the microprocessors can now be found everywhere, even in toilet seats, where they measure the temperature of the corresponding part of the body and control the built-in

shower water heater to equalize its temperature with the temperature of the said part of the body [3].

Such an universal expanding usage of microprocessor-based electronic components in all fields of the technology together with their persistent sophistication define the tendency of the technology development. This tendency is what we call an "advance" in the development of engineering and technology. Of course, there are certain fields of engineering and technology where computing and microprocessors are "must haves" and microprocessor technology has really enabled making a technological leap. However, implementation of the microprocessor-based devices is not always required due to the technical requirements to the products, and the number of such cases grows like an avalanche. Nevertheless, if you look at this tendency not as a bystander but as the "insider", in charge in maintenance and repair of complex industrial electrical devices, such as relay protection, high-power battery chargers, inverters and converters, uninterruptible power supplies, etc., you have to ask yourself if the tendency can really help the technical advance. You have to ask "Why?"

Just because the current boom resulted from the sharp sophistication of the devices and ever-widening usage of microprocessors in all fields of technology, and is generated by the intention of the manufacturers to outperform competitors, as well as their rush for innovations and increased profits by any and all means rather than by the real needs.

The aim to create something new or to reduce production costs could only be welcomed if this trend of substituting analog systems on discrete electronic components, which have proved their reliability for tens of years, to microprocessor-based would not lead to the significant sophistication of the equipment, making it irreparable, unreliable and expensive in maintenance in addition to the need for the sharp increase of qualification of the personnel. When you order the equipment, all these problems stay in the background, and you face them only during the maintenance. This is the price that the consumers must pay for the so-called "advance", that is, for the thoughtless and irresponsible complication of the devices, which is often proved only with the "technological fashion" and pursuit of profit. More details on this issue in [3].

3. SMART GRID – ONE MORE DANGEROUS VECTOR OF THE "TECHNOLOGICAL ADVANCE" IN POWER INDUSTRY

You could hardly find a media which did not re-sound with Smart Grid praises. The so-called "intelligent network" or Smart Grid is the technological "top fashion" promising us unprecedented wealth. Today everyone talks about his or her contribution to the development of this new fashioned trend. It turns out that not only the microprocessor-based power meters, but even electro-furnace transformers, reactive power compensation devices, superconducting power cables, etc., all are the elements of the "Smart Grid", and require investments in manufacture. Thus, governments create targeted investment programs and allocate billions spinning a huge wheel for sucking up and dispersal of the state budgets in the nondescript and unclear direction [4].

As is known, the Smart Grid concept assumes the installation of microprocessors in absolutely all elements of the power production, distribution and metering systems as well as arrangement of data channels between them based on the computer networks, which are generally wireless (Wi-Fi). The apologists of the Smart Grid see the future power system as a fancy modern online game with thousands of participants - the components of

the power networks. If we also consider the millions of the household power meters united in a common computer network (i.e., millions of potential points of network access for hackers), the grandeur and the danger of this idea due to the sharp increase in vulnerability of the power systems to hacker attacks, computer viruses and remote intentional destructive electromagnetic impacts (which are detailed in [4]) becomes even more obvious.

Today, the low-power, high-altitude electromagnetic pulse of a nuclear explosion set off in near space over the territory of a country is regarded as a real type of the so-called nonlethal weapons capable of disabling all the microelectronic devices over the whole country while not injuring people [17]. Alas, all these dangers, or "horror stories" as they are disparagingly referred to by some proponents of the "technological advance" in its present form, are hardly considered by scientists and engineers who receive their payrolls from the funds allocated to the development of the Smart Grid. They often say: our task is to advance the technologies, while protection of the national power systems is the "headache" of the army and intelligence agencies. Defectiveness of such an ideology is obvious and does not even require an explanation.

4. DANGEROUS TENDENCIES IN DEVELOPMENT OF THE RELAY PROTECTION

In previous publications we repeatedly drew attention to the dangers of some tendencies in the development of relay protection that is strongly promoted by the developers and manufacturers of the MPDs:

1. Continuous sophistication of the MPDs and increasing the number of protective functions in a single terminal [6, 10].

2. Overloading the MPDs with functions unusual to the relay protection, such as the monitoring of electrical equipment [11, 12].

3. Use of a non-deterministic logic in MPDs, as well as so-called "advance actions" that lead to the risk of the loss of control over the relay protection actions [11, 12].

4. Wide use of free programmable logic [13] in MPDs, resulting in the significant increase in the percentage of staff mistakes and faults of protection.

5. Complication of the serviceability checks and maintenance of the relays, while integrating numerous MPDs of different types and brands with different designs and software in the same power network. The lack of the common standards for the MPD design and software increases the intellectual load on staff and leads to significant economic losses [14]. This situation is exacerbated with every passing year.

6. The dramatic weakening of the electromagnetic immunity of the relay protection and the whole power system in proportion to the usage of the MPDs [15-17].

7. Increased vulnerability of the power systems to hacker attacks resulting from the expansion of the microprocessor-based devices and the usage of the cheap Ethernet and Wi-Fi lines instead of the relatively protected optoelectronic cables in the relay protection systems [18].

This sophistication, of both hardware and software, has not sunk in. As shown in [1, 5-9], even now the transition to the MPDs is accompanied by a significant decline in the reliability of the relay protection. However, the advocates of microprocessor-based relay protection believe that we should not be satisfied with what has already been achieved and must further sophisticate the MPDs by increasing the number of functions performed by a single terminal, by using freely-programmable logic, non-deterministic logic based on the theory of neural networks and algorithms of pre-emptive action, by over-

loading the MPDs with the functions of information-measuring systems and monitoring systems of power equipment and by using the wireless communication channels (Wi-Fi) between relays, etc.

The new-fangled ideas and developments in the field of MPDs are no longer limited only to the functions of relay protection. It is supposed that in the near future not only relay protection, but the whole power systems should correspond to the Smart Grid concept, which implies that all the power equipment of power system elements must be based on microprocessors to manage the exchange of synchronization signals and control commands between such elements via Wi-Fi.

What alluring prospects and inviting horizons! What enormous amounts of money are to be allocated from the government budgets to the new programs in the power systems! So many research and production teams can subsist on these budgets, periodically suggesting more and more improbable, but very "beautiful" ideas, and putting on the market more and more sophisticated but less reliable products.

It's a huge business, and nobody wants to be banned from this sweet "cake". The participants in this business are not concerned about the latest affects of their activities and seek only to quickly "push" their new-fashion ideas to the market.

Business is business and its fundamental laws are the same in all countries and areas, including such sensitive ones as relay protection and power management and control. Do you need a proof? Read the motto to the report on the symposium "Distribution systems of the future: Novel ICT solutions as the backbone for smart distribution" published in the PAC World magazine:



Fig. 2. The motto to the one of the articles in the worldwide popular specialized magazine "Protection, Automation and Control Magazine" – PAC World, September, 2011 (in the border)

The keywords in this motto are: "urgently" and "mandatory", that is, without the careful analysis of the remote effects of these innovations and without "unnecessary" criticism. Thus it has worked until today it is worldwide.

There was a period of sharp criticism of my publications and total negation of the non-amenities of the above relay development tendencies. However, in recent years many experts have started to understand the problems I have revealed (and, generally, without any reference to my earlier articles in major technical magazines of Russia, Europe and USA). For example, at the Second International Conference "Actual Trends in Developments of Power System Protection and Automation" (Moscow, September 7-10, 2009) B. Morris, R. Moxley, C. Kusch (Schweitzer Engineering Laboratories, USA) submitted a report: "Then Versus Now: A Comparison of Total Scheme Complexity", where they questioned the need for further sophistication of the protection and appealed to the comparative assessment of the reliability of the simple electromechanical relay protection and multifunction microprocessor-based protection systems. They stated that they have identified a trend of downward reliability of the relay protection systems built on sophisticated microprocessor-based devices.

The unreliability of MPDs was also raised by V.I. Pulyaev (FSK UES, Russia) at the Third International Conference "Actual Trends in Developments of Power System Protection and Automation" (St. Petersburg, May 30 – June 3, 2011). He particularly noted that the significant failure rate of relaying accounts for microprocessor units (approximately 23 % of all cases), which constitute only about 10% of the total number of protection devices. This is definitely one of the most important factors determining the need for special measures to enhance the reliability of the MPDs.

Now late Alexey Shalin (Ph.D., a professor of Electric Power Stations Department of the Novosibirsk State Technical University, leading specialist of LLC "PNP BOLID", Novosibirsk), in his article responding to one of my publications (see A. Shalin, "Microprocessor-based relay protection: analysis of the efficiency and reliability is required," in "News of Electrical Engineering", 2006, No. 2) commented that the percentage of malfunctions of the modern relay panels and cabinets often was significantly higher than of the old defenses based on electromechanical relays. He also presented statistical data confirming that the transition from the defenses based on electromechanical relays to microprocessor terminals was accompanied with the significant reduction in the efficiency and reliability.

The unreliability of current MPDs was the focus of the articles by A.N. Vladimirov (Central Dispatch Administration of UES of Russia); S. Swain, D. B. Ghosh (Integrated Electrical Maintenance) and others [19].

J. Stokoe and J. Gray, in their report "Development of a Strategy for the Integration of Protection & Control Equipment" submitted at the 7th International Conference "Developments in Power Systems Protection" (Amsterdam, 9-12-th April 2001) pointed out that the old electromechanical relays were strong and durable devices with a lifetime of 25 years, whereas the life of modern microprocessor-based protection is 15 years or less.

They echoed by J. Polimac and A. Rahim (PB Power, United Kingdom) who declared that the transition from electromechanical relays to microprocessor-based ones reduced the lifetime of protection from 40 years (EMR) to 15-20 years, and sometimes even to only a few years after commissioning (MPD) [19].

The Head of Computer Department of Engineering and Technology College (University of Poona, Maharashtra, India) Ashok Kumar Tiwari B. E. noted that the integration of numerous functions in a single microprocessor terminal significantly reduced the reliability of the relay protection, since the failure of the terminal will result in the loss of too many features, compared to the system where these functions are distributed among several terminals [19].

The necessity to limit the number of functions combined in a single MPD terminal was also mentioned in the report by V.A. Efremov, S.V. Ivanov (IC "Bresler") and D.V. Shabanov (Russia FGC) "Actual Trends in Developments of Power System Protection and Automation" also submitted at the same Third International Conference, mentioned above.

A. Fedosov and E. Pusenkov, (a subsidiary of OAO "SO UES" ODE Siberia) in their article "Problems arising from the introduction of microprocessor technology in the emergency control systems" ("Power Stations", 2009, No. 12) noted the lack of the strict standards on the MPD hardware and software has resulted in too great a variety of programs and algorithms built in the power system MPDs, which has lead to the faulty operations and increased the likelihood of faults of such devices.

The sharp vertical growth of the tasks performed by the personnel servicing the relay protection after the tran-

sition from EMR to MPD was referenced as the cause of severe accidents in power systems by D. Rayworth and M. A. Rahim (PB Power, UK) [19].

A. Belyaev, V. Shirokov and A. Emelyantsev (Specialized Department "Lenorgenerogaz", St. Petersburg) in their article "Digital terminals of RPA. Adapting to Russian conditions" ("News of Electrical Engineering", 2009, No. 5) also considered the complexity of program interface and the necessity for inputting numerous set points during the programming of MPDs.

The poor electromagnetic environment in the most of the old substations designed and built for the electromechanical relay protection, and not for microprocessor-based devices, as well as the resulting numerous MPD faults were noted by B.I. Kovalev, I.E. Naumkin (Siberian Energy Research Institute); A.M. Bordachev (JSC "Institute Energosetproject"), M. Matveev and M. Kuznetsov (OOO "Aesop"); P. Montignies, B. Jover (Schneider Electric, France); V. Nadein ("Arkhenargo"); V. Lopukhov (SUE "Tatenergo PEO"); A. Ermishkin (JSC "Mosenargo"), R. Borisov (NPF "ELNAP", Moscow); A. W. Sowa, J. Wiater (Electrical Department, Białystok Technical University, Poland) and others.

Many experts noted that the vulnerability of MPD to the electromagnetic interference is several orders higher than that of traditional electromechanical counterparts, and therefore to ensure the electromagnetic compatibility (EMC) of the secondary circuit their level of electromagnetic protection has to be significantly higher. Thus an acceptable level of MPD reliability can be reached only after providing for their EMC. Low EMC survivability of the MPDs is closely related to the deeper and more dangerous problem of remote intentional destructive electromagnetic impacts on the MPD, which we first considered in [15].

Many countries have already developed the devices that can remotely disable any microprocessor-based industrial systems (including the MPD, of course), so this problem was the focus of the numerous articles in technical magazines written by such well-known experts like Manuel W. Wik (Defense Materiel Administration, Sweden) and William A. Radasky (Metatech Corporation, USA), and also it was included in the reports of special committees of the U.S. Congress (e.g., see: "Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse Attack", 2008).

Another previously unknown challenge of the relay protection is the so-called cyber vulnerability of the MPDs (and, consequently, of the whole grid), or exposure to hacker attacks.

The paralysis of control systems, major outage of whole power systems, chaos within control systems, disconnection of Internet and cellular phones are all in the scenario of cyber war in the American apologists' opinion. Moreover, considering the strategic importance of such objects as power systems such attacks will rather be organized by special military cybernetic units than by single hackers. And such units have already been established in many countries of the world.

Last year the US Cyber Command started its operations. Being a part of the National Security Agency (NSA), the top secret and one of the most powerful intelligent agencies of the world, under the command of General Keith Alexander, the organization has united all previously existing cyber safety departments of the Pentagon. A year ago Cyber Command had about 1,000 employees, but the military had announced its initiation of a major hiring plan for particular specialists to increase the number of employees of this unit of NSA to 10,000 people.

Some of them will be in charge of the protection of military and state infrastructures as well as of the most

important commercial properties of the state. It's obvious that such a large structure will not only protect from the hacker attacks, but will also develop hacker attacks (after all, attack is the best defense). The current Head of Cyber Command, and Director of NSA General K. Alexander has declared at hearings of the Military Service Committee of House of the USA that the effect of cyber weapons is comparable to the effect of mass destruction weapons.

Cyber weapons are on the fast track. Experts say that many countries - including the USA, Russia, China, Israel, Great Britain, Pakistan, India, Northern and South Korea - have developed sophisticated cyber weapons which can repeatedly get into computer networks and are capable of destroying them. In 2010 the cyber budget of USA reached 8 billion USD, and in the future this amount will further grow. In 2011, USA plans to embrace a new doctrine of cyber safety. Its aims were revealed in a policy paper by Deputy Head of the Pentagon William Linn III under the symbolic name "New Space Protection". The main idea of the paper is that from now on the USA considers cyber space as the potential battlefield along with land, sea and air. In parallel, NATO has started to work on the development of a collective cyber safety concept. At an Alliance Summit held in November 2010, it was decided to develop a Cyber Safety Action Plan. The document should be ready by April 2011 and signed in June. The main concept of the document centers around the creation of a NATO Cyber Accident Response Center. Initially the Center was planned to be commissioned in 2015 but on the insistence of the USA this has been reduced by three years.

Effectiveness of cyber weapon was proved by the widely known cyber attack on the uranium enrichment plant in Natanz, Iran, with Win32/Stuxnet worm which destroyed hundreds of centrifuges.

Another massive attack was mounted in September 2011 on the Japanese corporation Mitsubishi Heavy Industries, engaged in the production of important parts of the F-15 jets, Patriot missile complexes, submarines, surface ships, rocket engines, guidance and intercept ballistic missiles systems, and other military equipment. Computer equipment of the corporation (45 private servers and around 50 PCs) was infected with a set of viruses, which took complete control over it. The viruses allowed controlling the computers from the outside and transfer the available data. Some viruses were aimed to activate the built-in computer microphones and cameras. This allowed the attackers to keep an eye on what's happening in the production and research facilities. Other viruses erased signs of cracking, which seriously complicated the assessment of the damage. Information from the computers was transferred to 14 websites located in other countries, including China, Hong Kong, USA and India.

Modern technologies allow infecting the computer system remotely through the encoded radio signals sent by unmanned aerial re-transmitters. Wi-Fi systems, which are planned to be the basis for Smart Grid, are particularly exposed to such infections. Built-in Wi-Fi modems have already been built into the MPDs by the leading Western manufacturers.

In the past there were attempts of computer penetration into the power system of Israel made by Iran. Senior CIA analyst Tom Donahue at a meeting between government officials and employees of USA companies from the power, water, oil and gas supply sector mentioned that CIA identified numerous attempts to penetrate the US power grid. Obviously, we can state that the cyber wars have already started and while they will intensify over time, the vulnerability of power systems will continue to increase too due to the current tendencies, thus forming a

very dangerous vector.

So today, we should stop turning a blind eye to the tangle of problems associated with the proliferation of the MPDs, disparagingly calling them "scary stories from Gurevich", since already today dozens of experts from many countries state that there are serious problems that need to be addressed.

5. WHAT TO DO?

In my opinion, it's time to put an end to the uncontrolled development of unproven and dangerous trends in the relay protection and automation systems, including the Smart Grid.

This requires the establishment of the National Coordinating Councils for the relay protection and intelligent networks, which must analyze current trends, develop national strategies and coordinate the standardization in these areas.

The Councils should include independent experts and specialists in the field of relay protection, microelectronics, data protection and electromagnetic compatibility, who do not have economic ties with the development and production of the MPDs or the elements of the Smart Grid. It should be noted that a purely mercantile financial interests of individuals and even entire scientific and industrial groups, interested in the funding of any new digital technologies in the power sector and, in particular, in the field of the relay protection, regardless of the long-term effects of such technologies and not limited to any frameworks, may result in national disasters in the near future.

New technologies in the field of relay protection, automation, communication and data transfer systems should not be introduced into service until the possible negative consequences of their wide distribution is fully considered in the light of accumulated experience, and until the effective measures to protect against remote intentional destructive impacts, whether intentional electromagnetic impacts or hacker attacks, is developed. Development of measures to protect sensitive electronic equipment of power systems against intentional destructive impacts should be considered as one of the main targets and it should be funded by amounts not less than those spent for the development of new technologies, such as the Smart Grid. Development of any new technology, based on digital microelectronics, should be considered as complete and ready for use in power industry only after the development of measures to protect it from the intentional destructive impacts.

New standards on microprocessor-based relay protection, which are required according to [20, 21], must include the requirements for the protection against intentional destructive impacts, as the current standards on electromagnetic compatibility (EMC) consider only the stability of the equipment against natural effects, rather than against intentional destructive electromagnetic impacts.

I must carefully examine the ways to improve the reliability of the MPDs by means of the modern redundancy hybrid relays [22, 23].

I am sure that it is the only acceptable direction of the technical advance in such an important and basic sector of any national infrastructure as power industry.

REFERENCES

1. Gurevich V. Microprocessor Protection Relays: New Prospects or New Problems? – "Electr. Engineering News", 2005, № 6 (36), p. 57-60.
2. Gurevich V. Microprocessor Protection Relays: alternating view. – Electro-info, 2006, № 4 (30), p. 40-46.
3. Gurevich V.I. Price for "the progress". – Components and Technologies, 2009, № 8.
4. Gurevich V.I. Smart Grid: New Perspectives or New Prob-

lems? – "Electrotech. Complexes and Control Systems", 2011, № 1, (Part I), 2011, № 3 (Part II).

5. Gurevich V. Reliability of Microprocessor-Based Relay Protection Devices – Myths and Reality. – Engineer IT, Part I: 2008, № 5, p. 55-59; Part II: 2008, № 7, p. 56-60.

6. Gurevich V. I. Reliability of Microprocessor-Based Protective Devices – Revisited. – Journal of Electrical Engineering, Vol. 60, № 5, 2009.

7. Gurevich V.I. Some Performance and Reliability Estimations for Microprocessor Based Protection Devices. – Electric Power's News, 2009, № 5, p. 29-32.

8. Gurevich V.I. How to Rebuild Relaying? – Energize, 2010, № 4, p. 36-39.

9. Gurevich V.I. Criteria of estimation for a relaying: Whether it is necessary to complicate a situation? – Electric Power's News, 2009, № 6, p. 45-48.

10. Gurevich V.I. Whether the Relay Protection is Safe? – Energy-Safety and Energy-Economy Magazine, 2010, № 2, p. 6-8.

11. Gurevich V. Sophistication of Relay Protection: Good Intentions or the Road to Hell? – Energize, 2010, Jan/Feb, p. 44-46.

12. Gurevich V.I. Sensational "Discovery" in the Relay Protection. – Power and Industry of Russia", 2009, p. 23-24.

13. Gurevich V. I. Logic in Free Flight. – "PRO Electrichestvo", 2011, № 2, p. 28-31.

14. Gurevich V. Tests of Microprocessor-Based Protection Devices. "PRO Electricity", 2008, № 1, p. 41-43.

15. Gurevich V. The Hazards of Electromagnetic Terrorism. – Public Utilities Fortnightly, 2005, June, p. 84-86.

16. Gurevich V.I. Problems of Electromagnetic Impacts on Digital Protective Relays. – "Components and Technologies", 2010, № 2, p. 60-64; № 3, p. 91-96; № 4, p. 46-51.

17. Gurevich V.I. Stability of Microprocessor Relay Protection and Automation Systems Against Intentional Destructive Electromagnetic Impacts. – Electrical Engineering & Electromechanics, 2011, № 5 (Part I); 2011, № 6 (Part II).

18. Gurevich V.I. Cyber Weapon Against of Power Industry. – Energize, 2011, № 10.

19. Problems of Microprocessor-based Relay Protection. <http://digital-relay-problems.tripod.com>.

20. Gurevich V.I. The Standardization in the Field of Microprocessor Protection Relays is Necessary. Electric Power's News, 2011, № 2, p. 34-42.

21. Gurevich V.I. The New Concept of Digital Protective Relays Design. – "Serbian Journal of Electr. Engineering", 2010, vol. 7, № 1, p. 143-151.

22. Gurevich V.I. Perspectives for Hybrid Technology in Relay Protection and Automation. – Components and Technologies, 2011, № 10, p. 70-73.

23. Gurevich V. Hybrid Reed-Solid-State Devices are a New Generation of Protective Relays. – Serbian Journal of Electr. Engineering, 2007, v.4, № 1, p. 85-94.

Received 24.11.2011

Gurevich Vladimir, Ph. D., Honorable Professor
Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corp.
POB 10, Haifa 31000, Israel
e-mail: vladimir.gurevich@gmx.net

Gurevich V.I.

Technological advance in relay protection: dangerous tendencies.

In the article, the modern lines in the development of relay protection are considered: complication, increasing number of functions, use of non-determined and free-programmed logic, use of Ethernet and Wi-Fi communications channels, decreasing reliability. The article highlights the danger of the existing tendencies in relay protection development and the necessity for creation of new lines of relay protection that are independent of the current developers and manufacturers. The article calls for creation of an Expert Coordination Council of specialists for development of the general strategy and ways of relay protection.

Key words – relay protection, tendency, evolution.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С СОСТАВНЫМИ СТЕРЖНЯМИ ДЛЯ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Розглянуто основні конфігурації матриці високоградієнтного сепаратора. Описано сили, що діють на наночастинку в сепаратійному каналі. Проведено моделювання елемента матриці в робочому проміжку. Запропонована нова конструкція матриці з складеними стрижнями для сепарації наночастинок в ліпідних оболонках.

Рассмотрены основные конфигурации матрицы высокоградиентного сепаратора. Описаны силы, действующие на наночастицу в сепарационном канале. Проведено моделирование элемента матрицы в рабочем зазоре. Предложена новая конструкция матрицы с составными стержнями для сепарации наночастиц в липидных оболочках.

ВВЕДЕНИЕ

В Украине, как и во многих других странах, в рамках государственной научно-технической программы НАН "Наноструктурные системы, наноматериалы и нанотехнологии" ведутся исследования по проблемам нанотехнологий [1]. Разрабатывается новый метод создания нанокompозита, который применяется в клинической онкологии при управляемой локальной гипертермии и направленной доставке лекарств.

Нанокompозит представляет собой противоопухолевый препарат в липосомной фракции содержащий ферромагнетик (магнетит). Один из этапов производства композита предусматривает нанесение липидного слоя поверхностно-активных веществ (ПАВ) на наноразмерный магнетит в ультразвуковом поле. В результате образуется две фракции – наночастицы ферромагнетика в липидной оболочке и не магнитные частицы липида (ПАВ). Первая фракция и является нанокompозитом, а вторую необходимо удалить из раствора. Так как фракции значительно различаются по магнитным свойствам целесообразно применить высокоградиентную магнитную сепарацию (ВГМС) для удаления избытка ПАВ.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

За последние несколько десятилетий техника высокоградиентной магнитной сепарации получила широкое распространение. Данный процесс применяется при обогащении каолина и обработке сточных вод [2]. Позже ВГМС использовалась для выборочного удаления клеток [3], экологических (радионуклиды) [4] и неполярных органических загрязнителей [5]. Высокоградиентная магнитная сепарация успешно применялась при разделении протеинов с помощью наночастиц покрытых фосфолипидом [6].

Принцип действия ВГМС сводится к захвату мелких частиц (магнитных и парамагнитных) ферромагнитной матрицей расположенной в сильном магнитном поле. Матрица концентрирует вторичное поле, что позволяет достичь высоких градиентов магнитной индукции в сепарационном канале. Технологический процесс ВГМС состоит из этапа извлечения (рис. 1,а) и этапа отмывки (рис. 1,б).

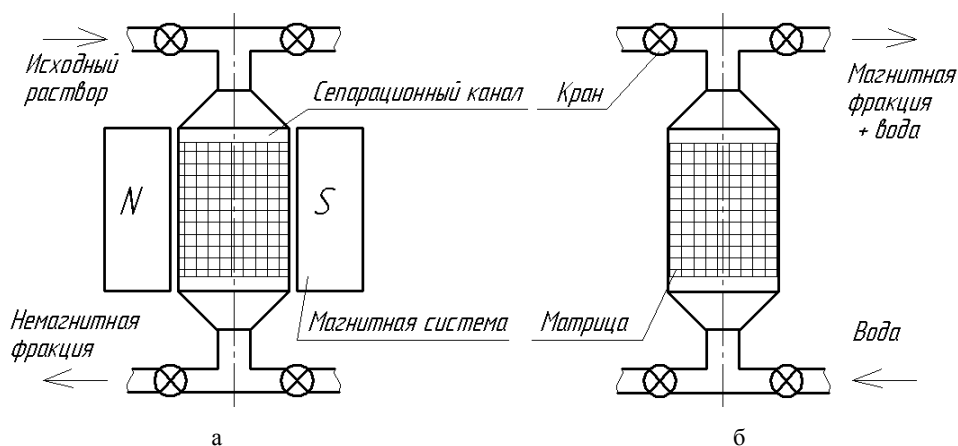


Рис. 1. Этапы высокоградиентной магнитной сепарации

Матрица представляет собой ферромагнитные провода или стержни определенным образом ориентированные в рабочем объеме. Все возможные конфигурации взаимного расположения элемента матрицы, потока исходного раствора (v_0) и направления магнитного поля (H_0) сводятся к трём основным вариантам (рис. 2).

При ориентации элемента матрицы перпендикулярно потоку (рис. 2,а,б) и высокой концентрации

магнитных частиц существует высокая вероятность механического захвата немагнитной частицы в слой магнитных. Следовательно, при сепарации наночастиц в липидных оболочках применение данной схемы может привести к недостаточно качественной очистке раствора от избытка ПАВ.

Вероятность механического захвата немагнитной частицы значительно снижается, если поток направлен параллельно элементу матрицы (рис. 2,в). В этом

случае, при высокой концентрации магнитных частиц, может произойти закупорка канала магнитными частицами, осевшими на поверхность элементов матрицы. При увеличении расстояния между стержнями матрицы вышеописанная ситуация будет исключена, но часть магнитных частиц не попадут в зону действия высокоградиентного поля и будут смыты вместе с немагнитной фракцией.

Анализ предыдущих исследований показал, что вопрос магнитной сепарации наночастиц в липидных оболочках остаётся открытым и требует дальнейших исследований.

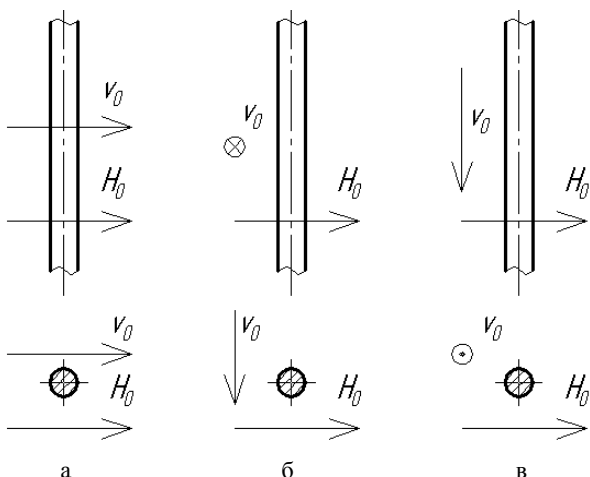


Рис. 2. Возможные геометрические конфигурации взаимного расположения элемента матрицы, направления магнитного поля и потока исходного раствора

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Описание сил, действующих на наночастицу в липидной оболочке при осевой конфигурации матрицы. Определение области захвата частиц с помощью моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics. Обоснование конструкции высокоградиентной матрицы и канала сепарации на основании результатов моделирования.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проблема исследования механизма захвата частиц в матрице высокоградиентного сепаратора может быть значительно упрощена, если рассматривать взаимодействие одной наночастицы с одним стержнем матрицы (рис. 3).

Известно уравнение баланса сил, определяющее движение магнитной наночастицы в потоке жидкости вблизи намагниченного стержня матрицы:

$$F = F_m + F_d + F_g + F_i + F_v, \quad (1)$$

где F_m – магнитная сила; F_d – сила диффузии; F_g – гравитационная сила; F_i – сила инерции; F_v – гидродинамическая сила.

Для наночастицы в липидной оболочке выполняется условие (2), следовательно, гравитационными и инерционными силами (F_g , F_i) можно пренебречь [7].

$$\frac{2\rho b_1^2}{9\eta} \ll 1, \quad (2)$$

где ρ и b_1 – плотность и радиус наночастицы в липидной оболочке; η – динамическая вязкость жидкости.

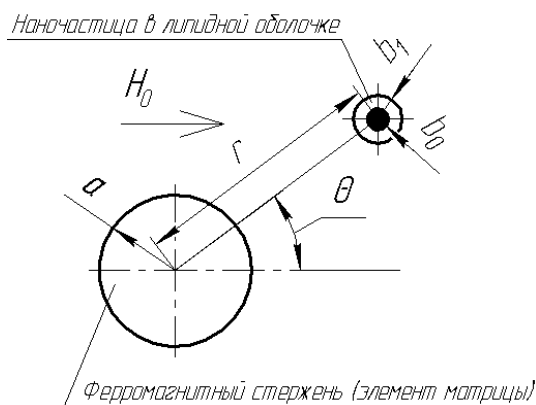


Рис. 3. Локация магнитного липида относительно стержня матрицы

Диффузия частицы может быть описана как движущая сила, которая является результатом градиента концентрации частиц [8]. В полярных координатах составляющие диффузионной силы могут быть записаны следующим образом:

$$F_{dr} = -\frac{kT}{n} \frac{dn}{dr}; \quad (3)$$

$$F_{d\theta} = -\frac{kT}{n} \frac{1}{r} \frac{dn}{d\theta}, \quad (4)$$

где T – абсолютная температура; n – концентрация.

Гидродинамическая сила получена из уравнения Стокса и составляющие этой силы:

$$F_{vr} = 6\pi\eta b_1 \left(v_r - \frac{dr}{dt} \right); \quad (5)$$

$$F_{v\theta} = 6\pi\eta b_1 \left(v_\theta - r \frac{d\theta}{dt} \right), \quad (6)$$

где v_r и v_θ – компоненты скорости потока жидкости.

В общем виде сила, воздействующая на частицу в магнитном поле, прямо пропорциональна градиенту напряженности ($\text{grad}H$) и намагниченности наночастицы ($M_{\text{чacm}}$):

$$F_m = \mu_0 V M_{\text{чacm}} \text{grad}H, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; V – объем наночастицы.

Напряженность поля вокруг намагниченного провода в полярных координатах [2]:

$$H_r = \left(\frac{M_{cm} a^2}{2r^2} + H_0 \right) \cos \theta; \quad (8)$$

$$H_\theta = \left(\frac{M_{cm} a^2}{2r^2} - H_0 \right) \sin \theta, \quad (9)$$

где H_0 – напряженность внешнего магнитного поля; M_{cm} – намагниченность стержня (элемента матрицы).

Основываясь на (7-9) запишем составляющие силы магнитного поля [6]:

$$F_{mr} = -\frac{4\pi\mu_0 M_{cm} M_{\text{чacm}} a^2 b_0^3}{3r^3} \left(\frac{M_{cm} a^2}{2H_0 r^2} + \cos 2\theta \right); \quad (10)$$

$$F_{m\theta} = -\frac{4\pi\mu_0 M_{cm} M_{\text{чacm}} a^2 b_0^3}{3r^3} \sin 2\theta, \quad (11)$$

где b_0 – радиус наночастицы без липидной оболочки.

Радиальный компонент магнитной силы (F_{mr}) между частицей и стержнем положителен при условии [7]:

$$\frac{M_{cm}a^2}{r^2} + H_0 \cos 2\theta > 0. \quad (12)$$

Составляющая F_{mr} становится отталкивающей в двух симметричных областях, границы которых определяются критическим углом (рис. 4):

$$\theta_{кр} = \arctan \left(\frac{1 + \frac{M_{cm}a^2}{2H_0r^2}}{1 - \frac{M_{cm}a^2}{2H_0r^2}} \right). \quad (13)$$

Таким образом, зная составляющие (1), можно рассчитать баланс сил, действующих на магнитную частицу, и её траекторию в сепарационном канале.

С помощью пакета COMSOL Multiphysics была создана плоскопараллельную модель. Стальной стержень ($a = 0,5\text{ мм}$, $\mu = 200$) помещён в однородное магнитное поле ($H_0 = 5,3 \cdot 10^5 \text{ А/м}$). Визуализация напряженности поля (рис. 4) показывает симметричные области притяжения и отталкивания, что подтверждается теоретическими выкладками (12, 13). Определена область гарантированного захвата магнитных частиц с учётом гидродинамической силы и диффузии (рис. 5) при скорости потока $0,002 \text{ м/с}$ и следующих характеристиках магнитных липидов [9]: $M_{част} = 3,2 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ ($H_0 = 4 \cdot 10^5 \text{ А/м}$); $b_l = 7 \text{ нм}$; $b_0 = 5 \text{ нм}$; $\eta = 120 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Зная область действия одного элемента матрицы можно предложить такую её конструкцию, при которой весь поток будет перекрыт высокоградиентным полем. А чтобы исключить возможность перекрытия проходного сечения захваченными магнитными частицами, стержни следует выполнить составными – состоящими из ферромагнитной и немагнитной частей (рис. 6). Моделирование поля матрицы с составными стержнями представлено на рис. 7.

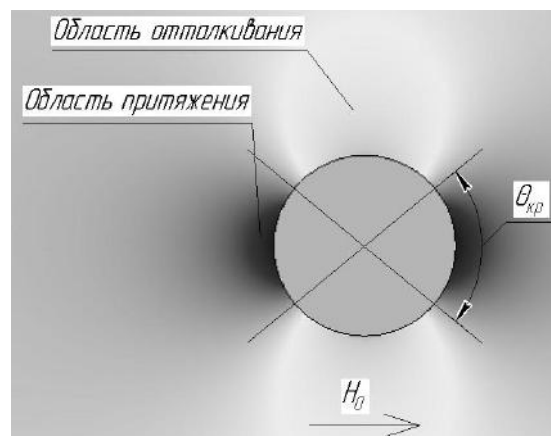


Рис. 4. Визуализация напряженности магнитного поля ферромагнитного стержня

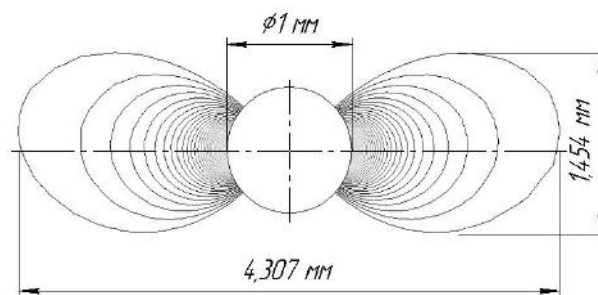


Рис. 5. Область действия притягивающей магнитной силы

Таким образом, исходный раствор, проходя через матрицу сепаратора, будет попадать в высокоградиентные поля, находящиеся в разных зонах канала, что обеспечит высокую эффективность разделения и гарантированное извлечение магнитных липидов из раствора.

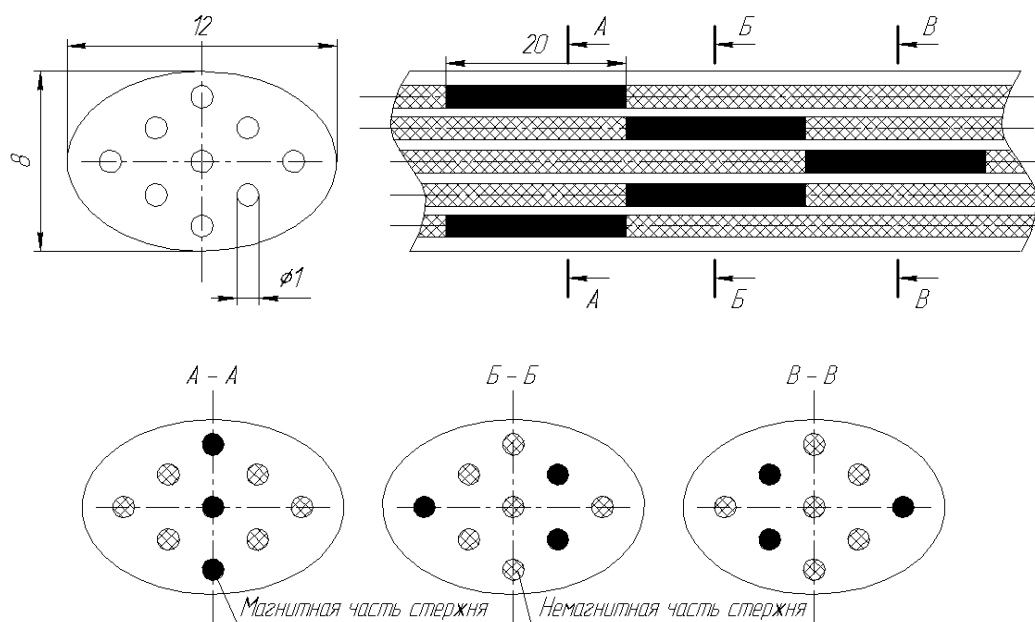


Рис. 6. Конструкция сепарационного канала с составными стержнями

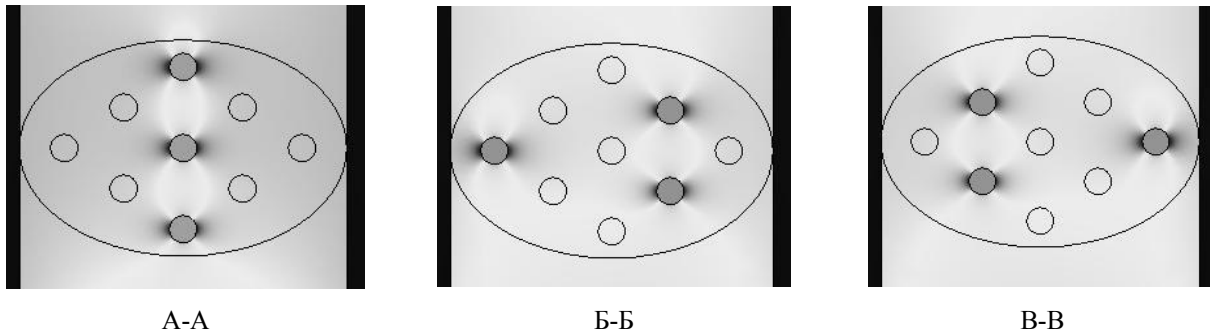


Рис. 7. Визуалізація напруженності поля в різних сеченнях каналу

ВЫВОДЫ

В работе описаны силы, действующие на наночастицу в липидной оболочке. Предложена конструкция высокоградиентной матрицы с составными стержнями, позволяющая осуществлять высокоэффективную сепарацию наночастиц в липидных оболочках. Математическим моделированием осуществлена визуализация напряженности магнитного поля в разных сечениях сепарационного канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постанова КМУ від 28.10.2009 №1231 Про затвердження Державної цільової науково-технічної програми "Нанотехнології та наноматеріали" на 2010-2014 р.
2. Gerber R. High Gradient Magnetic Separation / R.R. Birss // Research Studies Press, London. – 1983.
3. Šafarik Ivo Large-scale separation of magnetic bioaffinity adsorbents / Ptackova I L., Šafarikova I M. // Biotechnology Letters. – 2001. – № 23. – С. 1953-1956.
4. Buchholz B. A. Radiolysis and Hydrolysis of Magnetically Assisted Chemical Separation Particles / Nunez L., Vandegrift G.F. // Sep. Sci. Technol. – 1996. – № 31. – С. 1933.
5. Moeser G.D. Colloidal Magnetic Fluids as Extractants for Chemical Processing Applications // PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. – 2003.
6. Moeser G.D. Hatton High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles / Kaitlin A. Roach, William H. Green, Alan T. // American Institute of Chemical Engineers. – 2004. – № 50. – С. 2835-2848.
7. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials // Kluwer Academic Publishers. – 2004.
8. Fletcher D. Fine Particle High Gradient Magnetic Entrapment // IEEE Trans. Magn. – 1991. – № 27. – С. 3655.
9. Rotariu O. An in vitro study of magnetic particle targeting in small blood vessels // Phys. Med. Biol. – 2006. – №51. – С. 4869-4881.

Bibliography (transliterated): 1. Postanova KМУ vid 28.10.2009 №1231 Pro zatverdzhennya Derzhavnoi cil'ovoi naukovo-tehnichnoi programi "Nanotehnologii ta nanomateriali" na 2010-2014 r. 2. Gerber R. High Gradient Magnetic Separation / R.R. Birss // Research Studies Press, London. - 1983. 3. Šafarik Ivo Large-scale separation of magnetic

bioaffinity adsorbents / Ptackova I L., Šafarikova I M. // Biotechnology Letters. - 2001. - № 23. - С. 1953-1956. 4. Buchholz B. A. Radiolysis and Hydrolysis of Magnetically Assisted Chemical Separation Particles / Nunez L., Vandegrift G.F. // Sep. Sci. Technol. - 1996. - № 31. - С. 1933. 5. Moeser G.D. Colloidal Magnetic Fluids as Extractants for Chemical Processing Applications // PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. - 2003. 6. Moeser G.D. Hatton High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles / Kaitlin A. Roach, William H. Green, Alan T. // American Institute of Chemical Engineers. - 2004. - № 50. - С. 2835-2848. 7. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials // Kluwer Academic Publishers. - 2004. 8. Fletcher D. Fine Particle High Gradient Magnetic Entrapment // IEEE Trans. Magn. - 1991. - № 27. - С. 3655. 9. Rotariu O. An in vitro study of magnetic particle targeting in small blood vessels // Phys. Med. Biol. - 2006. - №51. - С. 4869-4881.

Поступила 15.12.2011

Кондратенко Игорь Петрович, д.т.н.
зав. отд. електромагнітних систем
Інститут електродинаміки НАН України
e-mail: dep7ied@ukr.net
тел. (044) 4564065

Некрасов Андрей Викторович, к.т.н., доц.
кафедра "Електричні машини та апарати"
Кременчугський національний університет
ім. Михайла Остроградського
тел. (053) 743245

Волканін Евгений Евгеньевич
Кременчугський національний університет
ім. Михайла Остроградського
e-mail: volkaninz@yandex.ua

Kondratenko I.P., Nekrasov A.V., Volkanin E.E.
An electrical engineering system with compound bars for high-gradient magnetic separation.

The basic configurations of a high-gradient separator matrix are considered. Forces acting on nanoparticles in the separating channel are described. Modeling of the matrix element in the operating gap is conducted. A new design of the matrix with compound bars is introduced for lipid-shell nanoparticles separation.

Key words – high-gradient magnetic separation, magnetic nanoparticles, modeling.

ШЕСТИФАЗНА ОБМОТКА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Описана шестифазна обмотка, яка складається з двох трифазних обмоток: одна обмотка з'єднана зіркою, інша – трикутником. Показано, що фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

Описана шестифазная обмотка, которая состоит из двух трехфазных обмоток: одна обмотка соединена звездой, вторая – треугольником. Показано, что фазные токи в обмотке, соединенной треугольником, должны быть сдвинуты по фазе в ту же сторону, в которую пространственно сдвинута обмотка треугольника.

Асинхронні двигуни складають 90 % всіх електро-двигунів та споживають більше половини всієї електроенергії. Тому навіть незначне покращення асинхронних двигунів може мати значний економічний ефект.

В [1] розглянута обмотка шестифазного струму, яка є поєднанням на загальному магнітопроводі двох однакових обмоток трифазного струму. Ці обмотки відрізняються від звичайних тільки тим, що на кожному полюсному діленні кожна фаза займає не 1/3, а тільки 1/6 загального об'єму пазів, тобто обмотки є більш зосередженими; в результаті коефіцієнти розподілу цих обмоток для основної гармоніки надзвичайно високі, що є немаловажним достоїнством. Дві такі обмотки зміщені взаємно на 1/6 полюсного ділення, а струми в них повинні бути зсунуті по фазі на 1/12 періоду.

Суттєвим недоліком шестифазної обмотки є необхідність в джерелі електричної енергії шестифазного струму і в шестипровідній лінії електропередачі.

Якщо фази однієї із трифазних обмоток ввімкнуті зіркою, а фази другої обмотки з'єднати в трикутник, то струми в цих обмотках будуть зсунуті по фазі на 1/12 періоду, як це було запропоновано в [2], тобто тим самим ліквідується основний недолік шестифазної обмотки. Звичайно, число витків фаз, що з'єднуються в трикутник, потрібно виконувати в $\sqrt{3}$ раз більшим, а поперечний переріз міді в $\sqrt{3}$ раз меншим порівняно з фазами, що з'єднуються в зірку.

Однак в [2] була допущена суттєва помилка, що нівелювала цю цікаву пропозицію. Вирішальне значення має правильне розміщення однієї трифазної обмотки відносно іншої. Фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

На рис. 1,а приведена схема шестифазної двополусної обмотки, виконаної на $Z = 12$ пазах.

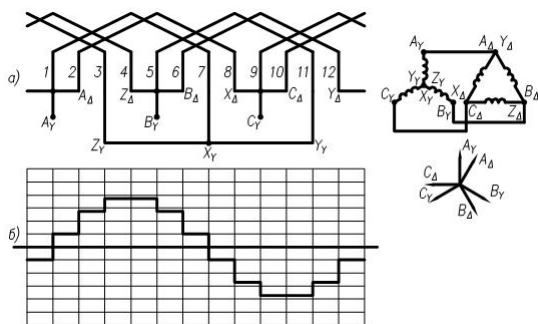


Рис. 1. Шестифазна обмотка

Число пазів на полюс і фазу кожної окремої трифазної обмотки $q = 1$, тому кожна фаза складається з одної котушки. Поряд показана принципова електрична схема, дві трифазні обмотки включені паралельно, а також вектори МРС всіх фаз для миті часу, коли МРС фази А обмотки, з'єднаної в зірку, максимальна.

Використовуючи розклад в ряд Фур'є для прямокутної форми кривої МРС окремої котушки

$$F_{kv} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \pi v (T_0/T)}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x, \quad (1)$$

де T_0 – крок котушки, T – просторова координата, дорівнює подвійному полюсному діленню, v – порядок гармоніки, x – змінна просторова координата. та вибравши початок координат по вісі фази А, з'єднаної в зірку, а також враховуючи просторовий зсув фаз В і С відповідно на кут 120° та 240° , одержимо значення МРС фазних обмоток, з'єднаних в зірку:

$$F_{AY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x,$$

$$F_{BY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2)$$

$$F_{CY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Для визначення результуючої МРС кожної гармоніки потрібно скласти відповідні гармоніки всіх трьох фаз.

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1Y} = \frac{1}{\pi} I_m w \left[\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{8\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) \right] = \frac{3}{\pi} I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) \quad (3)$$

Лівобігучі МРС, як зміщені одна відносно іншої на кут 120° , взаємно знищуються.

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5Y} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin \left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x \right). \quad (4)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7Y} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x\right). \quad (5)$$

МРС фазних обмоток, з'єднаних в трикутник:

$$F_{A\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6}\right),$$

$$F_{B\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6}\right), \quad (6)$$

$$F_{C\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin\left(\omega t - \frac{9\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6}\right).$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1\Delta} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right) \quad (7)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5\Delta} = \frac{1}{5\pi} I_m w \left[\begin{aligned} &\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi\right) + \\ &\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - 5\pi\right) + \\ &\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - 9\pi\right) \end{aligned} \right] =$$

$$= \frac{3}{5\pi} I_m w \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi\right). \quad (8)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7\Delta} = -\frac{1}{7\pi} I_m w \left[\begin{aligned} &\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi\right) + \\ &\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + 5\pi\right) + \\ &\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + 9\pi\right) \end{aligned} \right] =$$

$$= -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi\right). \quad (9)$$

Складуючи відповідні гармоніки двох трифазних обмоток, одержуємо для першої гармоніки:

$$\sum F_{1Y,\Delta} = \frac{6}{\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right). \quad (10)$$

Для п'ятої і сьомої гармонік:

$$\sum F_{5Y,\Delta} = \frac{6}{5\pi} I_m w \left[\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi\right) \right] = 0 \quad (11)$$

$$\sum F_{7Y,\Delta} = -\frac{6}{7\pi} I_m w \left[\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi\right) \right] = 0$$

Як бачимо, в кривій МРС, створеній шестифазною обмоткою, відсутні п'ята і сьома гармоніки, що є ще однією дуже важливою перевагою цієї обмотки перед звичайною трифазною обмоткою. Обмотковий коефіцієнт обмотки на рис. 1,а по основній гармоніці $k_{об.1} = 1$. Обмотковий коефіцієнт трифазної двополюсної обмотки з діаметральним кроком і числом пазів $Z = 12 \cdot k_{об.1} = 0,966$.

Графік МРС шестифазної обмотки на рис. 1,а для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 1,б.

Зовсім інша картина спостерігається, якщо струм в обмотці, з'єднаній трикутником, буде зсунутий по фазі в протилежному напрямі (рис. 2,а).

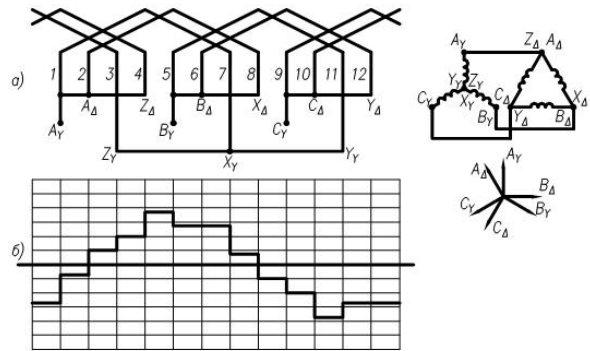


Рис. 2. Шестифазна обмотка

МРС фазних обмоток, з'єднаних в трикутник, для цього випадку:

$$F'_{A\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6}\right),$$

$$F'_{B\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6}\right), \quad (12)$$

$$F'_{C\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6}\right).$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F'_{1\Delta} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{3}\right). \quad (13)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F'_{5\Delta} = \frac{1}{5\pi} I_m w \left[\begin{aligned} &\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ &\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{14\pi}{3}\right) + \\ &\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{26\pi}{3}\right) \end{aligned} \right] =$$

$$= \frac{3}{5\pi} I_m w \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (14)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F'_{7\Delta} = -\frac{1}{7\pi} I_m w \left[\begin{aligned} &\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{4\pi}{3}\right) + \\ &\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{16\pi}{3}\right) + \\ &\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{28\pi}{3}\right) \end{aligned} \right] =$$

$$= -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{4\pi}{3}\right). \quad (15)$$

Складуючи перші гармоніки МРС обмотки, з'єднаної в зірку, і обмотки, яка з'єднана в трикутник згідно з рис. 2,а, одержуємо:

$$\sum F'_{1Y,\Delta} = \frac{3}{5} I_m w \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x + \frac{\pi}{3}\right) \right] \quad (16)$$

Із формули (16) видно, що МРС двох трифазних обмоток, зображених на рис. 2,а, направлені під кутом 60° ; сумарна МРС обмотки на рис. 2,а зменшується порівняно з сумарною МРС обмотки на рис. 1,а (формула (10)) на 13,4 %. Тобто з'являється обмотковий коефіцієнт по першій гармоніці, який дорівнює $k_{об.1} = \cos 30^\circ = 0,866$.

Відповідно п'ята і сьома гармоніки МРС обмотки на рис. 2,а

$$\begin{aligned} \sum F'_{5Y,\Delta} &= \frac{3}{5\pi} I_m w \times \\ &\times \left[\sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}\right) \right], \\ \sum F'_{7Y,\Delta} &= -\frac{3}{7\pi} I_m w \times \\ &\times \left[\sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \frac{4\pi}{3}\right) \right], \end{aligned} \quad (17)$$

тобто 5-а і 7-а гармоніки не зникають, як це має місце в обмотці на рис. 1,а. П'яті гармоніки МРС, створювані двома трифазними обмотками на рис. 2,а, як і сьомі гармоніки, направлені одна відносно іншої під кутом 120° . Порівняно із серійною трифазною обмоткою обмоткові коефіцієнти 5-ої і 7-ої гармонік зменшуються лише наполовину.

Графік МРС шестифазної обмотки по рис. 2,а для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 2,б. Поряд з рис. 2 розміщена принципова електрична схема, а також вектори МРС всіх фаз для миті часу, коли МРС фази А обмотки, з'єднаної в зірку, максимальна. Графік відрізняється від синусоїдної форми, що свідчить про наявність вищих гармонік. Площа, охоплена графіком МРС і лінією симетрії, на 13,4 % менша порівняно з графіком МРС по рис. 1,б.

ВИСНОВКИ

Шестифазна обмотка, представлена на рис. 1,а, збільшує обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці на 3,4 % та повністю ліквідує найбільш шкідливі в електричних машинах п'яту і сьому гармоніку, тим самим зменшуючи додаткові втрати, шум, вібрації, усуваючи провали в кривій електромагнітного моменту і збільшуючи пусковий момент. Ці висновки підтверджуються порівняльними випробуваннями двох кранових двигунів МТФ 311/6 серійного виконання і двох двигунів МТФ 311/6 з шестифазною обмоткою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1989. – 400 с.
2. А.с. № 79623 СССР, М. кл. 3/28. Трехфазный генератор. М.В. Липковский. Бюл. изобретений № 18, 1965.

Bibliography (transliterated): 1. Zherve G.K. Obmotki `elektricheskikh mashin. - L.: `Energoatomizdat. Lenigr. otd., 1989. - 400 s. 2. A.s. № 79623 SSSR, M. kl. 3/28. Trehfaznyj generator. M.V. Lipkovskij. Byul. izobretenij № 18, 1965.

Поступила 12.09.2011

Луцик В'ячеслав Данилович, д.т.н., проф.
Донбаський державний технічний університет
кафедра електричних машин та апаратів
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16
тел.: (06442) 2-31-23, e-mail: info@dgmi.edu.ua

Luschik V.D.

A six-phase winding of induction motors.

A six-phase winding which consists of two three-phase windings, one of star connection and the other of delta connection, is described. It is shown that phase currents in the delta-connected coil must be phase-shifted in the direction in which the delta winding is spatially shifted.

Key words – induction motor, six-phase winding, star connection, delta connection, phase currents.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭДС В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ

Подано найбільш детермінований метод гармонійного аналізу часових функцій ЕРС в електричних машинах. Він заснований на чисельних розрахунках обертових магнітних полів і використанні миттєвих значень магнітного потокозчеплення. Цим методом проведений порівняльний гармонійний аналіз ЕРС в трифазній обмотці для двох турбогенераторів, що відрізняються кількістю пазів статора, в режимах неробочого ходу і навантаження.

Представлен наиболее детерминированный метод гармонического анализа временных функций ЭДС в электрических машинах. Он основан на численных расчетах вращающихся магнитных полей и использовании мгновенных значений магнитного потокозцепления. Этим методом проведен сравнительный гармонический анализ ЭДС в трехфазной обмотке для двух турбогенераторов, отличающихся числом пазов статора, в режимах холостого хода и нагрузки.

Введение. В классической теории синхронных машин и соответствующих их расчетах [1, 2] гармонический анализ ЭДС в трехфазной якорной обмотке выполняется на основе ряда упрощений. Основой такого анализа является использование условных ступенчатых координатных кривых магнитодвижущей силы (МДС) обмоток, а также соответствующего распределения магнитной индукции в зазоре. При этом магнитные поля ротора и статора рассматриваются отдельно, игнорируется зубчатость сердечников и их взаимное перемещение, в крайнем случае – делается умозрительная оценка влияния односторонней зубчатости. Учет реального неравномерного насыщения магнитопровода сводится к введению единого коэффициента насыщения. Делается неадекватный переход от координатных функций распределения магнитного поля к временным функциям. В итоге выявляется лишь принципиальная суть наличия гармонического состава ЭДС, но надеяться на достоверные числовые значения его составляющих не приходится ввиду отмеченных и прочих серьезных допущений.

Отказаться от практически всех допущений, сколько-нибудь влияющих на результаты гармонического анализа магнитного поля и ЭДС в обмотках электрических машин практически любых типов, позволяют численные методы расчета магнитных полей в сочетании с современным компьютерным программным обеспечением. Основы такого подхода заложены в [3-5], а в данном случае представляется его дальнейшее развитие и расчетное применение.

Постановка задачи. Целью данной работы является представление принципа численно-полевого гармонического анализа временных функций ЭДС в обмотках электрических машин и практическая демонстрация соответствующего анализа на примере двух крупных турбогенераторов с разной зубчатой структурой статора. Суть принципа, обеспечивающая наиболее детерминированный и адекватный гармонический анализ, заключается в использовании временных функций магнитного потокозцепления (МПС), получаемых на основе численных расчетов синхронно вращающихся магнитных полей статора и ротора.

В качестве демонстрационных моделей расчетного анализа избраны два турбогенератора [6], близкие по мощности и конструкции (рис. 1, 2).

Объекты исследования. Первый турбогенератор (ТГ) (ТГ-1 на рис. 1) имеет номинальные параметры: мощность $P_{aN}=200$ МВт; фазные напряжение

$U_{sN}=9093$ В и ток $I_{sN}=8625$ А; коэффициент мощности $\cos \varphi_{sN}=0,85$; частота $f=50$ Гц. Его числа фаз $m_s=3$ и пар полюсов $p=1$; активная длина $l_a=5,286$ м; немагнитный зазор $\delta=0,1$ м; диаметр ротора $d_r=1,075$ м; относительное укорочение обмотки статора – 0,8; числа последовательных витков фазной обмотки статора $N_s=10$, обмотки ротора $N_r=180$.

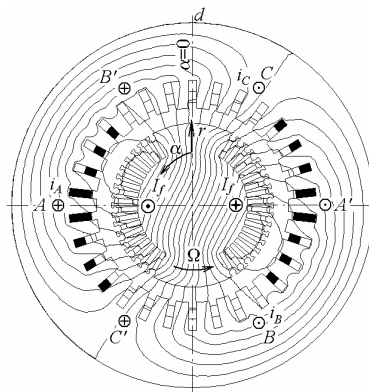


Рис. 1. Расчетная модель турбогенератора ТГ-1

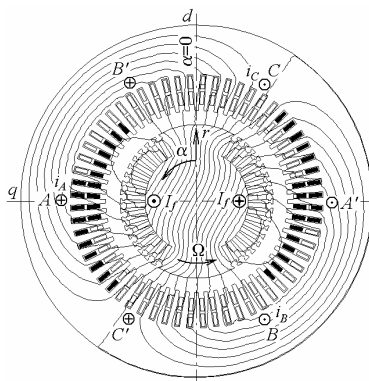


Рис. 2. Расчетная модель турбогенератора ТГ-2

Второй ТГ (ТГ-2 на рис. 2) имеет мощность 225 МВт и отличается наличием в обмотке статора двух параллельных ветвей $a = 2$; расчетной длиной – $l_a=5,1$ м и номинальным фазным током $I_{sN}=9703$ А.

Главное же отличие ТГ составляют числа пазов статора Q_s ; в ТГ-1 – 30, в ТГ-2 – 60.

В поперечных сечениях электромагнитной системы ТГ на рис. 1 и рис. 2 обозначены фазные зоны обмотки статора А-А', В-В' и С-С' (первая выделена затемнением); Ω – угловая скорость вращения ротора

и магнитных полей; r, α – принятая полярная система координат; d, q – продольная и поперечная оси ротора.

Расчетные режимы и магнитные поля в ТГ. В поперечном сечении ТГ (рис. 1, 2) квазистационарное магнитное поле описывается общеизвестным дифференциальным уравнением для аксиальной составляющей векторного магнитного потенциала A_z (ВМП) [7]. Численный расчет этого поля проводится с использованием общедоступной программы FEMM [8] на основе метода конечных элементов. Результатом расчета является дискретное координатное распределение $A_z(r, \alpha)$, на основе чего можно определить целый ряд электромагнитных параметров ТГ [7], в том числе и распределение составляющих магнитной индукции.

Гармонический анализ и, соответственно, расчеты магнитных полей проводились в двух режимах – холостого хода (ХХ) и номинальной нагрузки (НН). Организация расчетов осуществлялась в соответствии с установленным в [9, 10] порядком. Оба режима согласованы так, чтобы в них магнитное поле имело одинаковый уровень и магнитная система была примерно одинаково насыщена.

Так, в ТГ-1 для режима ХХ ток возбуждения I_f составлял 826,8 А, для режима НН 1881,7 А, в ТГ-2 – 770,4 и 1994,9 А, соответственно.

Фазные токи обмотки статора определялись в определенные моменты времени t :

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \cos(\omega t_k + \beta); \quad i_B = I_m \cos(\omega t_k - \frac{2}{3}\pi + \beta); \\ i_C &= I_m \cos(\omega t_k + \frac{2}{3}\pi + \beta), \end{aligned} \quad (1)$$

где $I_m = \sqrt{2}I_s$ – их амплитуда; I_s – действующее значение; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; β – угловое смещение оси, по которой действует МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к оси d ротора.

Значения β получены методом из [10], а именно, при НН $\beta = -155,74^\circ$ для ТГ-1 и $\beta = -158,47^\circ$ – ТГ-2.

В тех положениях роторов, которые представлены на рис. 1-2, принимались начала отсчета времени $t=0$ и их углового положения $\alpha=0$. На этих рисунках показаны соответствующие картины магнитных полей для режима НН.

На рис. 3 показаны координатные распределения радиальной составляющей магнитной индукции B_r по круговой средней линии зазора для двух ТГ в режимах ХХ и НН (τ_p – полюсное деление). Здесь и далее обозначение f соответствует магнитному полю ротора, l – совместному полю обмоток в режиме нагрузки.

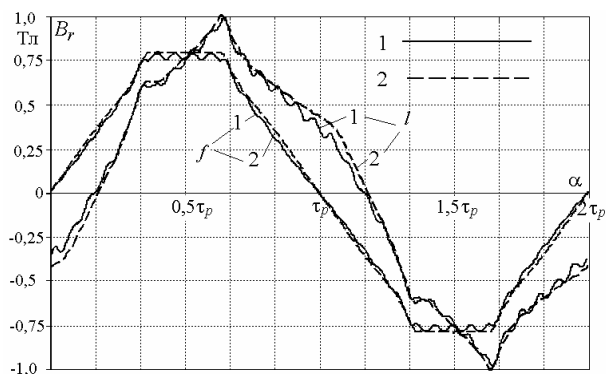


Рис. 3. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции по средней линии зазора в двух режимах при $t=0$ в исходной позиции ротора: 1 – ТГ-1; 2 – ТГ-2

Очевидно, что если ориентироваться на эти координатные функции $B_r(\alpha)$, то ожидать приемлемых гармонического состава и формы кривой ЭДС в обоих ТГ не приходится. Хотя можно отметить, что при большем числе пазов статора в ТГ-2 кривые $B_r(\alpha)$ более гладкие, в отличие от ТГ-1, где явно проявляются зубцовые пульсации. Особенно это впечатление усиливается, если взять распределение $B_r(\alpha)$ вблизи поверхности одного из сердечников. Как пример, на рис. 4 показано распределение $B_r(\alpha)$ на линии окружности, отстоящей от расточки статора на 10 мм.

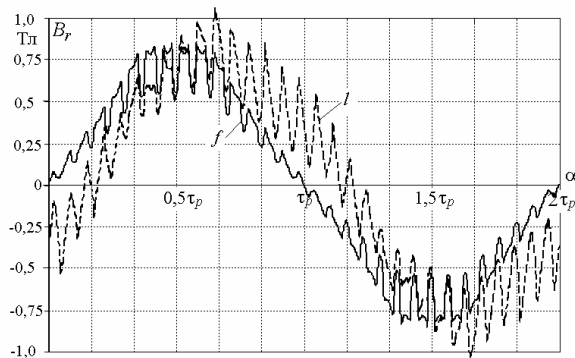


Рис. 4. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции в ТГ-1 на линии окружности вблизи расточки статора в двух режимах при $t=0$ в исходной позиции ротора

Становится понятным, что координатное распределение магнитной индукции в зазоре нецелесообразно брать за основу гармонического анализа ЭДС в ТГ.

Принцип численно-полевого гармонического анализа. При наиболее детерминированном гармоническом анализе ЭДС в ТГ базовой величиной является магнитное потокоцепление (МПС) фазной обмотки статора [3-5]. В частности, МПС фазной обмотки $A-A'$ (рис. 1, 2)

$$\Psi_A = N_s I_a \left(\frac{1}{S_A} \sum_{j=1}^{K_A} A_{z,av,j} \Delta S_j - \frac{1}{S_{A'}} \sum_{j=1}^{K_{A'}} A_{z,av,j} \Delta S_j \right), \quad (2)$$

$S_A, S_{A'}$ – площади сечения по всем токонесящим элементам фазных зон A и A' (на рисунках затемнены); $K_A, K_{A'}$ – числа конечных элементов их дискретизации; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе площадью ΔS_j . Заметим, что в программе FEMM предусмотрена процедура автоматического извлечения МПС для зон, выделяемых расчетчиком.

Эффект вращения магнитных полей достигается их многопозиционными расчетами с временным шагом Δt в моменты времени

$$t_k = \Delta t \cdot (k-1); \quad k = 1, 2, \dots, K_{\min}, \quad (3)$$

где K_{\min} – минимальное число шагов, которое позволяет сформировать функции МПС и ЭДС на их полном периоде изменения T .

Синхронное вращение ротора и магнитного поля обмотки статора обеспечивалось заданием фазных токов (1) в определенные моменты времени (3) и поворотами ротора в соответствующие угловые позиции

$$\alpha_k = \Delta \alpha \cdot (k-1); \quad k = 1, 2, \dots, K_{\min}, \quad (4)$$

где угловой шаг поворотов ротора

$$\Delta \alpha = \Omega \Delta t. \quad (5)$$

После расчета магнитного поля во все заданные моменты времени (3) и получения МПС (2) образуются

валась временная функция МПС фазной обмотки статора в дискретно-численной форме

$$\Psi_{s,k}(t_k); t_k = \Delta t (k-1); k=1,2,\dots,K, \quad (6)$$

где K – число значений, необходимых для гармонического разложения этой функции.

Повороты ротора (4), изменение токов статора (1), а также сбор информации (6) проводились при работе программы FEMM автоматически с использованием специально написанной подпрограммы на языке Lua, встроенном в FEMM. Про каждом очередном расчете магнитного поля генерировалась конечно-элементная структура примерно из 30 тыс. узлов и 60 тыс. треугольников.

Для других фазных обмоток временные функции МПС получались на основе сформированной по (6) функции $\Psi_{A,k}(t_k)$ для фазной обмотки A , а именно:

$$\Psi_{B,k}(t_k) = \Psi_{A,k}(t_k - \frac{2}{3}T); \Psi_{C,k}(t_k) = \Psi_{A,k}(t_k + \frac{2}{3}T). \quad (7)$$

Сформированные так временные функции МПС трех фазных обмоток в двух режимах ТГ-1 показаны на рис. 5 в пределах полного периода T . Для ТГ-2 на рис. 6, где ограничили только режимом НН.

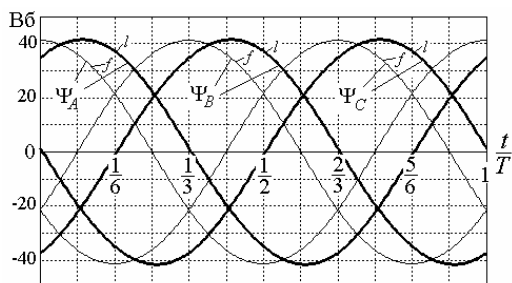


Рис. 5. Временные функции фазных МПС для ТГ-1

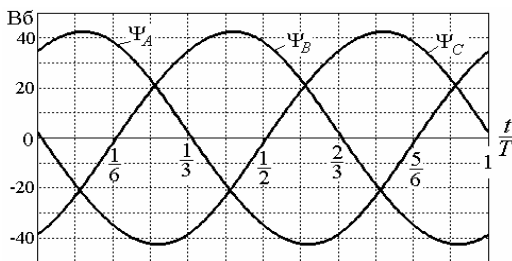


Рис. 6. Временные функции фазных МПС для ТГ-2

Первое, что обращает внимание на рис. 5-6, это близость временных функций МПС к синусоидальному характеру (насколько близко – проясняется далее в результате гармонического анализа). И главное здесь то, что этот благоприятный для ТГ характер весьма далек от характера координатных функций магнитной индукции в зазоре (рис. 3, 4).

Минимизация количества расчетов поля K_{\min} (3) для получения необходимого числа данных K (6) оказалась возможна на основе следующих соображений.

Во-первых, в ТГ имеет место условие полупериодичности поля по координате α :

$$A_z(r, \alpha + \pi) = -A_z(r, \alpha), \quad (8)$$

что позволяет обойтись формированием функции (6) в пределах полупериода $T/2$, т.е. при повороте ротора в пределах полюсного деления τ_p или угла π .

Во-вторых, сформировать функцию $\Psi_{s,k}(t_k)$ в пределах $T/2$ можно, используя расчеты поля в пределах

$T/6$, т.е. поворачивая ротор в пределах $\tau_p/3$ или на 60° (электрических градусов). С этой целью по (2) информация собирается для каждой фазной обмотки и получаются в числовой форме три функции:

$$\Psi_{A,k}(t_k); \Psi_{B,k}(t_k); \Psi_{C,k}(t_k); t_k = \Delta t (k-1); k=1,2,\dots,K_{\min}. \quad (9)$$

После этого для фазной обмотки A с учетом (7) формируется временная функция на полупериоде с учетом взаимного соответствия функций МПС фазных обмоток на рис. 5-6:

$$\Psi_{A,k}(t_k + T/6) = -\Psi_{B,k}(t_k); \Psi_{A,k}(t_k + T/3) = \Psi_{C,k}(t_k) \quad (10)$$

при $k=1,2,\dots,K_{\min}$, и с учетом (8) на полном периоде

$$\Psi_{A,k}(t_k + T/2) = -\Psi_{A,k}(t_k) \text{ при } k=1,2,\dots,3 \cdot K_{\min}. \quad (11)$$

В данной работе принят достаточно малый угол поворота $\Delta\alpha = 1^\circ$ и на полюсном делении (аналогично – в пределах временного полупериода) получалось $K=180$ позиций, а реально для формирования дискретных функций (7) достаточно было провести расчеты в $K_{\min}=60$ позициях (4). Исходной позиции соответствовал угол $\alpha_1=0$, конечной – $\alpha_{60}=59^\circ$. Эти 60 автоматизированных расчетов поля по программе FEMM на компьютере среднего уровня (2,8 ГГц) длились 43 минуты. Примеры картин магнитного поля для режимов ХХ и НН в исходном и конечном положениях даны для ТГ-1 на рис. 7. Повороты и взаимное соответствие магнитных полей очевидны.

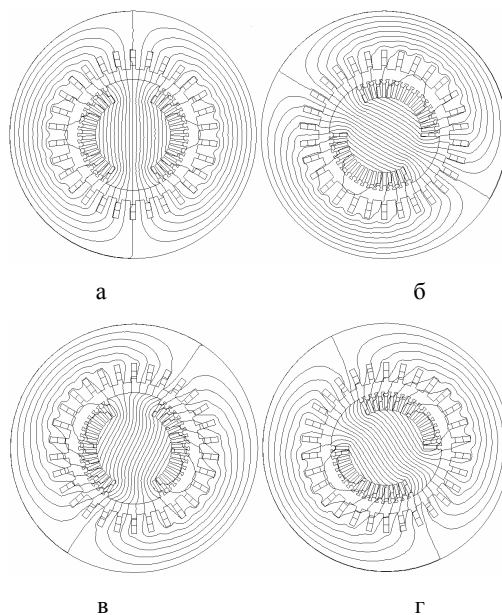


Рис. 7. Магнитные поля ТГ-1: а, б – режим ХХ, в, г – режим НН, причем а, в – при $t=0$ в исходной позиции ротора; б, г – в момент времени после поворота ротора на 59°

В дополнение к этому и к рис. 3 на рис. 8 добавлен график $B_z(\alpha)$ для НН ТГ-1 при повороте ротора на 59° .

Учитывая уже принятые функции токов (1), временная дискретная функция МПС (6) $\Psi_{s,k}(t_k)$ раскладывалась в единый косинусный ряд [11]

$$\Psi = \sum_{v=1,3,5,\dots}^N \Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \zeta_v). \quad (12)$$

Амплитуды и аргументы гармоник

$$\Psi_{m,v} = \sqrt{s_v^2 + c_v^2}; \zeta_v = -\arctg(s_v/c_v) \quad (13)$$

определяются по данным (6) через коэффициенты индивидуальных синусного и косинусного рядов для гармонической составляющей с текущим номером v :

$$s_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_{s,k} \sin v \omega t_k; c_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_{s,k} \cos v \omega t_k. \quad (14)$$

Теперь на основании закона электромагнитной индукции можно через (12) определить гармонический ряд фазной ЭДС

$$e_s = -\frac{d\Psi}{dt} = \sum_{v=1,3,5\dots}^{N_g} v \omega \Psi_{m,v} \cos(v \omega t + \zeta_v - \pi/2) \quad (15)$$

и непосредственно амплитуды и действующие значения ее гармоник

$$E_{m,v} = v \omega \Psi_{m,v}; E_v = \frac{1}{\sqrt{2}} v \omega \Psi_{m,v}. \quad (16)$$

Ряды (12) и (15) содержит только нечетные гармоники – ввиду условий (8) и (11). Допустимый номер гармоники N_g не должно превышать выбранного для (6) числа значений K (это число интервалов Δt на полупериоде, т.е. на $T/2$).

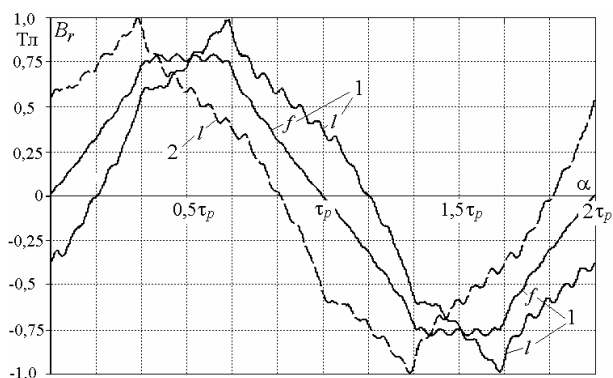


Рис. 8. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции по средней линии зазора в ТГ-1 в режимах XX – f и HH – l: 1 – при $t=0$ в исходной позиции ротора; 2 – в момент времени после его поворота на 59°

Расчетный анализ гармонического состава МПС и ЭДС фазных обмоток статора проведен для упомянутых уже режимов XX и HH.

Результаты разложения функций фазных ЭДС по выражениям (12), (13) и (16), представлены в табл. 1 и табл.2. В табл.1 даются относительные значения амплитуд наиболее весомых гармоник – начал рядов МПС и ЭДС

$$\Psi_{m,v}^* = \Psi_{m,v} / \Psi_{m,1}, E_{m,v}^* = E_{m,v} / E_{m,1}, \quad (17)$$

где за базу приняты амплитуды $\Psi_{m,1}$ и $E_{m,1}$ первых гармоник.

Таблица 1

Относительные значения амплитуд гармоник								
Тип ТГ	Режим	v	3	5	7	9	11	13
ТГ-1	XX	$\Psi_{m,v}^*$	0,0138	0,0002	0,0004	0,0003	0,0001	0,0000
		$E_{m,v}^*$	0,0415	0,0008	0,0031	0,0026	0,0009	0,0002
	HH	$\Psi_{m,v}^*$	0,0095	0,0002	0,0007	0,0006	0,0004	0,0002
		$E_{m,v}^*$	0,0286	0,0009	0,0052	0,0050	0,0046	0,0030
ТГ-2	XX	$\Psi_{m,v}^*$	0,0071	0,0001	0,0003	0,0004	0,0000	0,0000
		$E_{m,v}^*$	0,0212	0,0003	0,0021	0,0032	0,0002	0,0002
	HH	$\Psi_{m,v}^*$	0,0136	0,0010	0,0006	0,0005	0,0002	0,0001
		$E_{m,v}^*$	0,0408	0,0048	0,0044	0,0048	0,0021	0,0019

Дополнительно отметим, что для ТГ-1 еще наиболее заметные амплитуды ЭДС в режиме XX состав-

ляли $E_{m,v}^* = 0,0011..0,0061$ для гармоник с номерами $v=29, 49, 53, 55, 59, 65, 67, 71, 73, 79, 85, 89, 91, 95, 101, 109, 113, 115, 119, 121, 125, 127, 131, 133, 137, 139, 143, 145, 149, 155, 157, 161, 163, 165, 167, 169, 173, 175$; для режима HH $E_{m,v}^* = 0,0011..0,0047$ для гармоник $v=17, 19, 35, 41, 43, 49, 55, 71, 73, 77, 79, 83, 85, 89, 91, 95, 97, 101, 103, 107, 109, 111, 113, 115, 119, 121, 125, 133, 137, 139, 141, 143, 145, 149, 151, 153, 155, 157, 161, 163, 167, 169, 173, 175, 179$.

Для ТГ-2 спектр заметных гармоник оказался менее представительным, а именно – наиболее заметные амплитуды ЭДС в режиме XX составляли $E_{m,v}^* = 0,0011..0,0027$ для гармоник с номерами $v=59, 125, 127, 143, 145, 161, 163, 167, 169, 179$; для режима HH $E_{m,v}^* = 0,0012..0,0064$ для гармоник $v=23, 25, 29, 31, 41, 43, 59, 61, 67, 73, 77, 91, 101, 113, 119, 131, 133, 137, 139, 161, 163, 167, 173, 175, 179$.

В табл. 2 выделены максимальное значение МПС Ψ_{max} , а также данные первых гармоник: амплитуда МПС и действующее значение ЭДС, начальные фазы из (12), (15).

Таблица 2

Расчетные параметры для первой гармоники							
Тип ТГ	Режим	Ψ_{max} , Вб	$\Psi_{m,1}$, Вб	E_1 , В	$k_{dist,\Psi}$	$k_{dist,E}$	ζ_1 , градус
ТГ-1	XX	41,28	41,85	9297	0,9999	0,9990	0,10
	HH	41,61	41,72	9268	1,0000	0,9994	-32,26
ТГ-2	XX	42,19	42,50	9441	1,0000	0,9997	0,01
	HH	42,60	42,36	9411	0,9999	0,9990	-33,74

Кроме того, даны коэффициенты искажения кривых МПС и ЭДС

$$k_{dist,\Psi} = \frac{\Psi_{m,1}}{\sqrt{2} \Psi_{eff}}; k_{dist,E} = \frac{E_1}{E_{eff}}, \quad (18)$$

где действующие значения их полных функций

$$E_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{v=1,3,5\dots}^{N_g} E_{m,v}^2}; \Psi_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{v=1,3,5\dots}^{N_g} \Psi_{m,v}^2}$$

Очевидно, что эти коэффициенты достаточно близки к единице, и это в целом свидетельствует о достаточно хорошей форме кривых МПС и ЭДС.

На рис. 9 построены временные функции МПС Ψ_A и ЭДС e_A по результатам разложения (12) и (15) для фазной обмотки А. Кроме того, для ЭДС более тонкой линией построены синусоиды первой гармоники $e_{A,1}$ для двух режимов.

Отклонения полных функций (15), с учетом всех гармоник до высшего номера $N_g=179$, от первой гармоники очевидны, хотя и незначительны. Причем для ТГ-1, по сравнению с ТГ-2, в режиме XX отклонения побольше, в режиме HH – наоборот, что подтверждают и данные табл.1 и табл.2. Характерно, что для режима HH отличия результирующая кривая несколько "заваливается" вправо по отношению к кривой 1-ой гармоники, что косвенно подтверждает "перекося" кривых $B_r(\alpha)$ на рис. 3 в этом режиме, в отличие от более симметрированных кривых для режима XX.

В кривых e_A , и особенно в режиме HH, на рис. 9 заметны некоторые "расчетные шероховатости" – пульсации из-за высших гармоник. Но они не носят чрезмерно губительного характера – это подтверждено значениями коэффициентов искажения (табл.2).

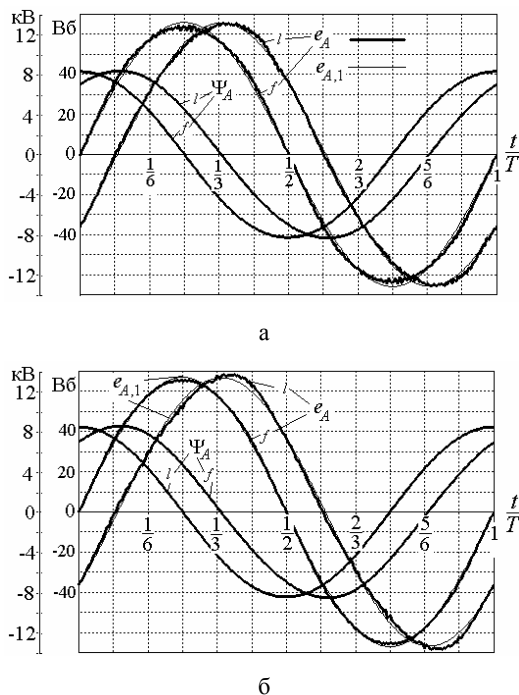


Рис. 9. Временные функции МПС и ЭДС фазной обмотки в режимах XX (f) и НН (l): а) ТГ-1; б) ТГ-2

Выводы. 1. Представленный метод гармонического анализа ЭДС в обмотке статора ТГ является наиболее детерминированным, так как основан на использовании временных функций магнитных потоков сцеплений, формируемых посредством численных расчетов магнитного поля в процессе его вращения. Существенным является уход от традиционного рассмотрения магнитных полей в зазоре и условно выделяемых полей рассеяния. Этот метод лишен целого ряда условностей, принятых в классической теории ЭМ, которая объясняет существование спектра гармоник, но не дает для них реалистичных значений.

2. В рассмотренных ТГ в функциях фазных ЭДС присутствует весьма широкий спектр гармоник с относительными значениями на уровне 0,001...0,04 от амплитуды первой гармоники, причем выделяется третья гармоника. Но в целом характер изменения ЭДС близок к синусоидальному, при незначительных искажениях, что и естественно для рассмотренных реалистичных конструкций ТГ.

3. Удвоение числа зубцов статора ТГ не привело к заметному изменению формы кривых ЭДС: в режиме XX – чуть улучшило, в режиме НН – наоборот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Титов В.В., Хугорский Г.М. и др. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
3. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ магнитного поля и электродвижущих сил в полностью сверхпроводниковом криотурбогенераторе (и объективный взгляд на реакцию якоря) // *Электротехника и электромеханика*. – 2002. – №2. – С. 47-52.
4. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ характера ЭДС, вызываемых реакцией якоря в турбогенераторе // *Вісник НУ "Львівська політехніка"*, №487, *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. Львів: НУ "ЛП", 2003. – С. 10-17.
5. Милых В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ ЭДС в турбогенераторе на основе численных расчетов вращаю-

щихся магнитных полей в различных режимах // *Электротехника и электромеханика*. – 2004. – № 4. – С. 46-51.

6. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій // Ю.В.Зозулін, О.Є.Антонов, В.М.Бичік та ін. – Харків: ПФ "Колегіум", 2011. – 228 с.

7. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // *Электротехника и электромеханика*. – 2006. – № 2. – С. 40-46.

8. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.

9. Милых, В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // *Электротехника и электромеханика*. – 2011. – № 5. – С. 33-38.

10. Милых, В.И., Полякова Н.В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // *Электротехника и электромеханика*. – 2012. – № 1. – С. 36-41.

11. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М.: Наука, 1973. – 832 с.

- Bibliography (transliterated):** 1. Vol'dek A.I. `Elektricheskie mashiny. L.: `Energiya, 1978. - 832 s. 2. Titov V.V., Hutoreckij G.M. i dr. Turbogeneratory. -L.: `Energiya, 1967. - 895 s. 3. Milyh V.I., Polyakova N.V. Analiz magnitnogo polya i `elektrodvizhushchih sil v polnost'yu sverhprovodnikovom krioturbogeneratore (i ob`ektivnyj vzglyad na reakciyu yakorya) // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2002. - №2. -S. 47-52. 4. Milyh V.I., Polyakova N.V. Analiz haraktera `EDS, vyzyvayemyh reakciej yakorya v turbogeneratore // *Visnik NU "L'vivska politehnika"*, №487, *Elektroenergetichni ta elektromehaniichni sistemi*. L'viv: NU "LP", 2003. - S. 10-17. 5. Milyh V.I., Polyakova N.V. Garmonicheskij analiz `EDS v turbogeneratore na osnove chislennyh raschetov vraschayuschihysya magnitnyh polej v razlichnyh rezhimakh // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2004. - № 4. - S. 46-51. 6. Stvorenyya novih tipiv ta modernizaciya diyuchih turbogeneratoriv dlya teplovih elektrichnih stancij // Yu.V.Zozulin, O.E.Antonov, V.M.Bichik ta in. - Harkiv: PF "Kolegium", 2011. - 228 s. 7. Milyh V.I., Polyakova N.V. Opredelenie `elektromagnitnyh parametrov `elektricheskih mashin na osnove chislennyh raschetov magnitnyh polej // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2006. - № 2. - S. 40-46. 8. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <<http://femm.berlios.de>>. 9. Milyh, V.I., Polyakova N.V. Sistema napravlenij i fazovyh sootnoshenij `elektromagnitnyh velichin pri chislennyh raschetah magnitnyh polej v turbogeneratore // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2011. - № 5. - S. 33-38. 10. Milyh, V.I., Polyakova N.V. Organizaciya chislennogo rascheta magnitnogo polya turbogeneratora v rezhime nagruzki s obespecheniem zadannyh ego vyhodnyh parametrov // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2012. - № 1. - S. 36-41. 11. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov*. M.: Nauka, 1973. - 832 s.

Поступила 12.02.2012

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

Milykh V.I., Polyakova N.V.

Comparative numerical field analysis of EMF harmonic composition in turbogenerators.

The paper presents the most deterministic method of EMF temporal function harmonic analysis in electric machines. It is based on numerical calculations of rotary magnetic fields and utilization of instantaneous values of magnetic linkage. The method is applied to comparative harmonic analysis of the EMF in three-phase windings of two turbogenerators with different number of the stator slots in the idle mode and under load.

Key words – turbogenerator, magnetic field, numerical calculations, magnetic linkage, EMF, harmonic analysis.

ІНЖЕНЕРНИЙ МЕТОД ВРАХУВАННЯ ВИХРОВИХ СТРУМІВ У МОДЕЛЯХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті запропоновано інженерну методіку врахування в моделях електромеханічних систем вихрових струмів та ефекту їхнього витіснення в магнітопроводах, що дає змогу збільшити точність моделювання за незначного збільшення обсягу обчислень.

В статті предложена инженерная методика учета в моделях электромеханических систем вихревых токов и эффекта их вытеснения в магнитопроводах, что дает возможность увеличить точность моделирования при незначительном увеличении объема вычислений.

ВСТУП

Розвиток комп'ютерних методів розрахунку електромеханічних систем дав змогу підняти точність аналізу їхніх динамічних процесів. Одним з факторів збільшення точності відтворення у моделях поведінки електромеханічних об'єктів є врахування вихрових струмів і ефекту їхнього витіснення у магнітних системах. Традиційні способи для цього передбачають розв'язування польових задач [1] або поділ магнітної системи на шари з наступним описом кожного шару відповідними диференціальними рівняннями [2]. Проте у багатьох випадках отримана таким чином точність є надлишковою, особливо, коли дослідника не цікавлять внутрішні процеси у магнітному середовищі, а сам електротехнічний чи електромеханічний об'єкт розглядається як "чорна скринька". Такий підхід є типовим у моделюванні систем автоматичного керування (САК), тому в цьому разі достатньо обмежитися простішою моделлю, яка, по-перше, є значно швидкодійнішою, і, по-друге, має достатню точність для відтворення поведінки об'єкту в складі електромеханічної системи.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

У випадку дослідження динаміки систем керування, як вже згадано вище, достатньою є точність, яку забезпечують наближені методи, один з яких пропонується в даній статті. Як приклад застосування такого наближеного методу можна навести розрахунок динаміки систем керування електроприводами кар'єрних екскаваторів, які побудовані за системою Г-Д і експлуатуються до цього часу. Процеси, викликані наявністю вихрових струмів у масивних станинах генераторів постійного струму та явищем їхнього витіснення, у цьому випадку не є визначальними, тому можна відчутно підняти швидкість моделювання завдяки заміні описаних вище точних моделей описом згаданих явищ запропонованою апроксимацією, як це показано нижче.

Використання спрощеної методіки врахування явища витіснення вихрових струмів ґрунтується на допущенні, що станина не насичується. Дане допущення є цілком справедливе, бо більшість динамічних процесів у магнітопроводах електромеханічних систем не проходять у номінальному режимі, в якому вже відчувається вплив нелінійності кривої намагнічування. У цьому випадку можливе застосування аналітичного виразу для розподілу магнітного поля в ме-

талі, який наведено у [3], там же можна знайти і вирази розподілу густини струму в металі скінченої товщини:

$$j = j_0 (e^{-\alpha d} + e^{-\alpha(b-d)}), \quad (1)$$

де j_0 – значення густини струму на краї металу; d – відстань від краю; b – товщина металу;

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}, \quad (2)$$

де ω – кутова частота змінного струму; μ – магнітна проникність металу; σ – питома провідність, для сталі $\sigma \approx 10^7$ СМ/м.

Зазвичай, ефект наявності вихрових струмів у моделях електромеханічних систем враховують введенням у заступну схему фіктивного контуру вихрових струмів так, як показано на рис. 1 для кола збудження машини постійного струму (аналогічно можна здійснити для інших заступних схем), де використано позначення: U_d , i_d – відповідно, напруга і струм збудження; R_d – активний опір обмотки збудження; L_s – індуктивність розсіювання обмотки збудження; L_μ , i_μ – відповідно, індуктивність і струм намагнічування обмотки збудження; R_k – активний опір фіктивного контуру вихрових струмів; i_k – струм фіктивного контуру вихрових струмів.

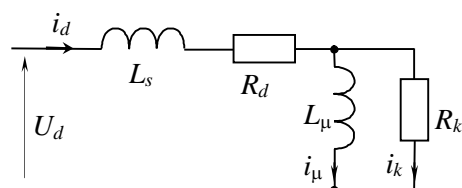


Рис. 1. Еквівалентна схема кола збудження машини постійного струму з врахуванням фіктивного контуру вихрових струмів

Така модель кола збудження машини постійного струму описується системою диференціальних і алгебричних рівнянь:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} + i_d R_d + L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = U_d ; \\ L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = i_k R_k ; \\ i_\mu + i_k - i_d = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для більшості машин постійного струму з масивною станиною стала часу еквівалентного контуру вихрових струмів складає 15-30 % від сталої часу обмотки збудження, точніше значення знаходиться за емпіричною формулою [4]:

$$T_k \cong \frac{4l_j a^2 b^2}{\pi k_p \delta (a^2 + b^2)},$$

де l_j – довжина силової лінії у спинці між полюсами у сантиметрах; a, b – товщина і довжина спинки станини (у даній формулі – в сантиметрах); $k_p = 2 \cdot 10^4$ (для сталі).

Врахувати явище витіснення вихрових струмів внаслідок поверхневого ефекту можна введенням коефіцієнта зміни опору фіктивного контуру вихрових струмів з частотою, тобто

$$K_\sigma = \frac{R_k}{R_\omega},$$

де R_ω – опір фіктивного контуру вихрових струмів на частоті ω ; R_k – опір фіктивного контуру вихрових струмів на постійному струмі.

Коефіцієнт K_σ знаходиться шляхом інтегрування розподілу струму внаслідок поверхневого ефекту:

$$K_\sigma = \frac{1}{2b} \int_0^b (e^{-\alpha x} + e^{-\alpha(b-x)}) dx = \frac{1 - e^{-\alpha b}}{\alpha b}.$$

З деяким наближенням імітацію збільшення опору еквівалентного контуру вихрових струмів з частотою внаслідок поверхневого ефекту можна здійснити введенням додаткової індуктивності (позначимо її L_k) послідовно з опором R_k (рис. 2). Така заміна є приближною з таких причин:

- коефіцієнт K_σ зростає майже пропорційно квадратному кореню з частоти на відміну від індуктивного опору – див. рівняння (2);
- не враховується насичення станини у місцях концентрації магнітного поля.

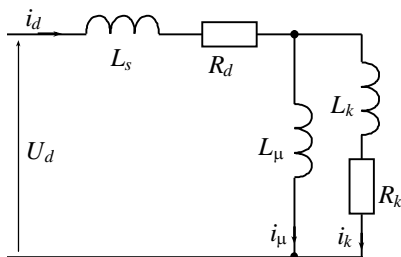


Рис. 2. Еквівалентна схема кола збудження машини постійного струму з пропонованим способом врахуванням вихрових струмів з ефектом їхнього витіснення

Заступна електрична схема кола збудження машини постійного струму в такому випадку матиме вигляд, що показаний на рис. 2 і буде описуватися такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} + i_d R_d + L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = U_d; \\ L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = L_k \frac{di_k}{dt} + i_k R_k; \\ i_\mu + i_k - i_d = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Величина додаткової індуктивності фіктивного контуру вихрових струмів L_k може вибиратися кількома способами, наприклад:

- за максимальним наближенням перехідної характеристики (реакції на одиничний стрибкоподібний імпульс) такої моделі до експериментальної перехідної характеристики реальної машини постійного струму в режимі генератора;
- за максимальним наближенням перехідної характеристики пропонованої моделі до перехідної характеристики точнішої комп'ютерної моделі, наприклад, реалізованої за способом [1];
- за зближенням амплітудно-частотних характеристик коефіцієнта K_σ і ланки, утвореної додатковою індуктивністю L_k і опором R_k .

Як показали експериментальні дослідження, для більшості електричних машин постійного струму з масивною станиною значення фіктивної індуктивності L_k знаходиться в межах (1...2) L_μ , тому за відсутності експериментальних даних або для першого наближення під час побудови моделі можна брати величину додаткової індуктивності L_k такою ж, як й індуктивність обмотки збудження L_d .

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Використання пропонованого способу врахування наявності вихрових струмів з ефектом їхнього витіснення у магнітопроводі показано на прикладі розрахунку динаміки тягового електроприводу з двигуном послідовного збудження [5]. Такий електропривод використовується у тролейбусах з тиристорним перетворювачем за принципом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Отримані результати моделювання для двох типів моделей:

- за системою рівнянь (3) – без врахування поверхневого ефекту;
 - за системою (4) – з врахуванням ефекту витіснення вихрових струмів пропонованим способом,
- порівнювалися з результатом стендового експерименту для системи тягового електроприводу тролейбуса в режимі пуску. Графіки струмів якоря та швидкостей для двох типів моделей і експерименту показано, відповідно, на рис. 3-4.

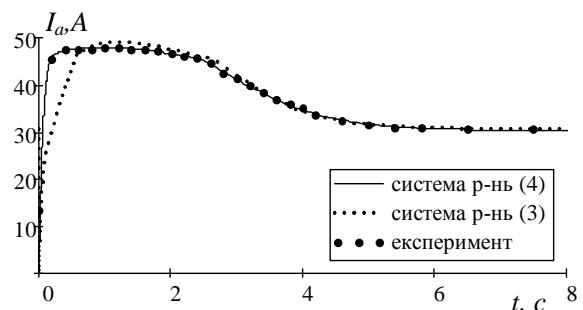


Рис. 3. Графіки струму якоря для моделей тягового електроприводу тролейбуса

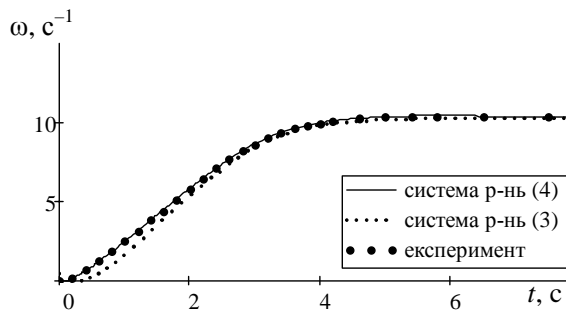


Рис. 4. Графіки кутової швидкості для моделей тягового електроприводу тролейбуса

ВИСНОВКИ

Застосування запропонованого способу врахування вихрових струмів з ефектом їхнього витіснення дає змогу отримати низку переваг у комп'ютерному моделюванні електромеханічних систем:

- достатньо простий і зрозумілий шлях врахування вихрових струмів і ефекту їхнього витіснення;
- спосіб може застосовуватися до електротехнічних і електромеханічних систем, магнітні кола яких можна описувати еквівалентними заступними схемами;
- використання у комп'ютерному моделюванні забезпечує вищу швидкість порівняно з розв'язуванням польових задач, при цьому досягається точність отриманих результатів, достатня для інженерних розрахунків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Заблодський М.М. Математичне моделювання електромагнітних і теплових полів в електротепломеханічному перетворювачі енергії [електронний ресурс] / М.М. Заблодський // Науковий портал Донбасу [електронне наукове видання]. – 2007. – №2(2). – Режим доступу до ресурсу : http://almamater.luguniv.edu.ua/elect_v/N2/index.htm.
2. Плахтина О.Г. Уточнення моделі генератора постійного струму при моделюванні електроприводів / О.Г. Плахтина, В.І. Мороз // Вісник ДУ "Львівська політехніка". – 1995. – № 288. – С. 80-83.
3. Федоров Н.Н. Основы электродинамики: Учеб. пособие для вузов / Н.Н. Федоров. – М.: Высш. шк., 1980. – 399 с.
4. Слежановский О.В. Об учете и компенсации влияния вихревых токов в системах управления потоком возбуждения электрических машин / О.В. Слежановский // Электричество. – 1962. – № 9. – С. 23-27.
5. Мороз В. Уточнення моделі двигуна постійного струму послідовного збудження / В. Мороз, Л. Карплюк // Вісник ДУ "Львівська політехніка". – 1998. – № 347. – С. 118-123.

Bibliography (transliterated): 1. Zablodskij M.M. Matematichne modelyuvannya elektromagnitnih i teplovih poliv v elektroteplomexanichnomu peretvoryuvachi energii [elektronnij resurs] / M.M. Zablodskij // Naukovij portal Donbasu [elektronne naukove vidannya]. – 2007. – №2(2). – Rezhim dostupu do resursu : http://almamater.luguniv.edu.ua/elect_v/N2/index.htm. 2. Plahatina O.G. Utochnennya modeli generatora postijного strumu pri modelyuvanni elektroprivodiv / O.G. Plahatina, V.I. Moroz // Visnik DU "L'vivs'ka politehnika". – 1995. – № 288. – S. 80-83. 3. Fedorov N.N. Osnovy `elektrodinamiki: Ucheb. posobie dlya vuzov / N.N. Fedorov. – M.: Vyssh. shk., 1980. – 399 s. 4. Slezhanovskij O.V. Ob ucheti i kompensacii vliyanija vihrevyh tokov v sistemah upravleniya potokom vzbuzhdeniya `elektricheskikh mashin / O.V. Slezhanovskij // `Elektrichestvo. – 1962. – № 9. – S. 23-27. 5. Moroz V. Utochnennya modeli dviguna postijного strumu poslidovного zbudzhennya / V. Moroz, L. Karplyuk // Visnik DU "L'vivs'ka politehnika". – 1998. – № 347. – S. 118-123.

Надійшла 30.09.2011

Мороз Володимир Іванович, д.т.н., доц.,
Національний університет "Львівська політехніка"
інститут енергетики та систем керування
кафедра "Електропривод і автоматизація промислових установок"

79013, Львів, вул. Ст. Бандери, 12
тел. (032) 2582620, e-mail: vmoroz@lp.edu.ua

Снітков Ігор Філатович
зав. НДІ-68 СКБ електромеханічних систем
Національний університет "Львівська політехніка"
79000, Львів, вул. ак. Ф. Колесси, 2,
тел/факс (032)-258-24-41, e-mail: snit68@polynet.lviv.ua

Харчишин Богдан Михайлович, к.т.н., с.н.с.
Національний університет "Львівська політехніка"
в.о. директора СКБ електромеханічних систем
пров. наук. співробітник НДІ-68
79000, Львів, вул. ак. Ф. Колесси, 2,
тел/факс (032)-258-24-31, e-mail: xbohdan@gmail.com

Moroz V.I., Snitkov I.F., Kharchishin B.M.

An engineering method of eddy current allowance in electromechanical system models.

In the article, an engineering method of allowance for eddy currents and effect of their displacement in the magnetic cores in electromechanical system models is introduced, which enables to increase modeling accuracy with insignificant increase in volume of computation.

Key words – engineering method, electromechanical systems, eddy currents, calculation.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАСИЧЕНОГО ТРИФАЗНОГО КОНДЕНСАТОРНОГО АСИНХРОННОГО МОТОРА

Пропонується математична модель насиченого трифазного конденсаторного асинхронного мотора в однофазному стані. Диференціальні рівняння електромеханічного стану записано в нормальній формі Коші. Наводяться результати розрахунку на ЕОМ перехідного процесу.

Предлагается математическая модель насыщенного трехфазного конденсаторного асинхронного двигателя в однофазном режиме. Дифференциальные уравнения электромеханического состояния записаны в нормальной форме Коши. Приводятся результаты расчета на ЭВМ переходного процесса.

ВСТУП

Однофазний стан трифазного конденсаторного асинхронного мотора – достатньо частий випадок в практиці експлуатації електричних машин за відсутності трифазного джерела живлення. Конденсатор в такому разі може під'єднуватись на стало для роботи в експлуатаційному стані, а може під'єднуватись лише для виконання пускових функцій з подальшою роботою без нього [1]. Математична модель такого стану роботи мотора (особливо у випадку невеликої потужності) повинна конче передбачати явище насичення головного магнетного кола, бо саме конденсатор сприяє його появі. За основу побудови такої моделі скористаємося теоретичними розробками по створенню L - і Ψ -моделей звичайних неявнополюсних машин змінного струму [2].

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Тут, як і в [1] математичну модель насиченого трифазного асинхронного мотора в однофазному стані одержимо, виходячи з відомої добре апробованої на практиці моделі трифазного стану мотора. Найзручнішою тут є L -модель у косогональних координатах [1, 2]. За таких умов диференціальні рівняння згадуваної математичної моделі в розгорнутому вигляді приймають вигляд (обмотка ротора за числом витків вважається приведеною до числа витків обмотки статора) [2]

$$L di / dt = Y, \quad (1)$$

де

$$L = \begin{bmatrix} l_s + l_A & l_{AB} & l_A & l_{AB} \\ l_{BA} & l_s + l_B & l_{BA} & l_B \\ l_A & l_{AB} & l_R + l_A & l_{AB} \\ l_{BA} & l_B & l_{BA} & l_R + l_B \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$i = \begin{bmatrix} i_{SA} \\ i_{SB} \\ i_{RA} \\ i_{RB} \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} u_{SA} - r_S i_{SA} \\ u_{SB} - r_S i_{SB} \\ -\omega(\Psi_{RA} + 2\Psi_{RB})/\sqrt{3} - r_R i_{RA} \\ \omega(2\Psi_{RA} + \Psi_{RB})/\sqrt{3} - r_R i_{RB} \end{bmatrix}.$$

Тут i_{SA} , i_{SB} – фазні струми обмотки статора за умови, що $i_{SC} = -i_{SA} - i_{SB}$; u_{SA} , u_{SB} – фазні напруги обмотки статора; i_{RA} , i_{RB} – перетворені струми обмотки ротора; Ψ_{RA} , Ψ_{RB} – перетворені повні потокозчеплення обмотки ротора; ω – кутова швидкість ротора в ел. рад./с; l_A , l_B , l_{AB} , l_{BA} – диференціальні індуктивності,

вони є функціями магнетного стану мотора; l_s , l_R – індуктивності дисипації обмоток статора й ротора; r_s , r_R – резистивні опори обмотки статора й ротора, причому

$$u_{SA} = U_m \sin \omega_0 t; \quad u_{SB} = U_m \sin(\omega_0 t - 2\pi/3), \quad (3)$$

де U_m – амплітуда мережі живлення; ω_0 – її кутова частота.

Повні потокозчеплення обмотки ротора шукаємо у звиклий спосіб

$$\Psi_{Rk} (k = A, B) = (i_{Sk} + i_{Rk})/\tau + i_{Rk}/\alpha_R;$$

де τ – обернена основна статична індуктивність мотора; $\alpha_S = 1/l_s$; $\alpha_R = 1/l_R$ – обернені індуктивності дисипації обмотки статора й ротора.

Алгоритм обчислення диференціальних індуктивностей ми тут не подаватимемо, бо модель (1) нами не буде на завершальному етапі використовуватись. При потребі його можна знайти в [2].

В однофазному стані вважатимемо, що фази A і B ввімкнуті на лінійну напругу $u_{AB} = u_{SA} - u_{SB}$. Напругу u_{BC} братимемо від конденсатора $u_{BC} = u_C$, ввімкненого у фазу C . У такому разі рівняння конденсатора можна подати у вигляді

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{i_{SA} + i_{SB}}{C}, \quad (4)$$

де C – ємність конденсатора.

Рівняння електромагнетного стану мотора треба доповнити рівняннями механічного руху (штивністю і дисипацією механічних ланок, – як це прийнято в теорії електричних машин, – нехтуємо) [1, 2]

$$\frac{d\omega}{dt} = p_0(M_E - M)/J, \quad (5)$$

де $M = M(\omega, t)$ – механічний момент; J – момент інерції; p_0 – кількість пар магнетних полюсів машини; M_E – електромагнетний момент [2]

$$M_E = \sqrt{3} p_0 (i_{RA} i_{SB} - i_{RB} i_{SA}) / \tau. \quad (6)$$

Якщо в (1) від першого рядка відняти другий, а за тим додати до нього подвоєний другий (маючи на увазі, що $i_{SC} = -i_{SA} - i_{SB}$), то одержимо рівняння електромагнетного стану мотора [1] у вигляді

$$L = \begin{bmatrix} l_S + l_A - l_{BA} & l_{AB} - l_B - l_S & l_A - l_{BA} & l_{AB} - l_B \\ 2l_{BA} + l_A + l_S & 2l_S + 2l_B + l_{AB} & 2l_{BA} + l_A & 2l_B + l_{AB} \\ l_A & l_{AB} & l_R + l_A & l_{AB} \\ l_{BA} & l_B & l_{BA} & l_R + l_B \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$Y = \begin{bmatrix} \sqrt{3}U_m \sin(\omega t + 30^\circ) - r_S(i_{SA} - i_{SB}) \\ u_c - r_S(i_{SA} + 2i_{SB}) \\ -\omega(\Psi_{RA} + 2\Psi_{RB})/\sqrt{3} - r_R i_{RA} \\ \omega(2\Psi_{RA} + \Psi_{RB})/\sqrt{3} - r_R i_{RB} \end{bmatrix}.$$

Диференціальні рівняння (1), (4), (5) за умови (7) – шукана L -модель однофазного стану трифазного конденсаторного асинхронного мотора. Незручність її в тому, що в процесі числового інтегрування за явним принципом виникає потреба на кожному часовому кроці обертати матрицю коефіцієнтів. Це не тільки ускладнює обчислювальний процес, але, що основне, приводить до суттєвого зменшення точності в результаті чого ми втрачаємо можливість аналізу тривалих перехідних процесів. Тому обернемо матрицю диференціальних індуктивностей аналітично. В результаті одержимо шукану A -модель

$$di/dt = AY, \quad (8)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots \\ -\alpha_{11}a_1 - \alpha_{21}a_2 & -\alpha_{12}a_1 - \alpha_{22}a_2 & \dots \\ -\alpha_{11}a_3 - \alpha_{21}a_4 & -\alpha_{12}a_3 - \alpha_{22}a_4 & \dots \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \dots & -\alpha_{11}c_1 - \alpha_{12}c_2 & -\alpha_{11}c_3 - \alpha_{12}c_4 \\ \dots & -\alpha_{21}c_1 - \alpha_{22}c_2 & -\alpha_{21}c_3 - \alpha_{22}c_4 \\ \dots & l_{33} - \alpha_{31}c_1 - \alpha_{32}c_2 & l_{34} - \alpha_{31}c_3 - \alpha_{32}c_4 \\ \dots & l_{43} - \alpha_{41}c_1 - \alpha_{42}c_2 & l_{44} - \alpha_{41}c_3 - \alpha_{42}c_4 \end{bmatrix}.$$

Тут

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= d_{22}/d; \alpha_{12} = -d_{12}/d; \alpha_{21} = -d_{21}/d; \alpha_{22} = d_{11}/d; \\ a_1 &= l_{33}l_{31} + l_{34}l_{41}; a_2 = l_{33}l_{32} + l_{34}l_{42}; a_3 = l_{43}l_{31} + l_{44}l_{41}; \\ a_4 &= l_{43}l_{32} + l_{44}l_{42}; c_1 = l_{13}l_{33} + l_{14}l_{43}; c_2 = l_{23}l_{33} + l_{24}l_{43}; \\ c_3 &= l_{13}l_{34} + l_{14}l_{44}; c_4 = l_{23}l_{34} + l_{24}l_{44}; d_{11} = l_{11} - l_{31}c_1 - l_{41}c_3; \\ d_{12} &= l_{12} - l_{32}c_1 - l_{42}c_3; d_{21} = l_{21} - l_{31}c_2 - l_{41}c_4; \\ d_{22} &= l_{22} - l_{32}c_2 - l_{42}c_4; d = d_{11}d_{22} - d_{12}d_{21}; \\ l_{11} &= l_{13} + 1/\alpha_S; l_{12} = l_{14} - 1/\alpha_S; l_{13} = l_{31} - l_{41}; \\ l_{14} &= l_{32} - l_{42}; l_{21} = l_{23} + 1/\alpha_S; l_{22} = l_{24} + 2/\alpha_S; \\ l_{23} &= 2l_{41} + l_{31}; l_{24} = 2l_{42} + l_{32}; l_{33} = (l_{42} + 1/\alpha_R)/\Delta; \\ l_{34} &= -l_{32}/\Delta; l_{43} = l_{41}/\Delta; l_{44} = (l_{31} + 1/\alpha_R)/\Delta; \\ l_{31} &= b(2i_A + i_B)i_A + 1/\tau; l_{32} = b(2i_B + i_A)i_A; \\ l_{41} &= b(2i_A + i_B)i_B; l_{42} = b(2i_B + i_A)i_B + 1/\tau; \end{aligned}$$

$$\Delta = \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\alpha_R}\right)\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\alpha_R}\right); \quad b = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\tau}\right)\frac{1}{i_m^2}, \quad (10)$$

причому, τ, ρ – обернені статична й диференціальна індуктивності, їх знаходимо за характеристикою намагнетичування (холостого стану) машини як:

$$\tau = \left[\frac{\Psi_m(i_m)}{i_m}\right]^{-1}; \quad \rho = \left[\frac{d\Psi_m(i_m)}{di_m}\right]^{-1}, \quad (11)$$

де i_m – модуль просторового вектора намагнетичувальних струмів

$$i_m = 2\sqrt{(i_A^2 + i_{A'B} + i_B^2)/3}; \quad i_A = i_{SA} + i_{RA}; \quad i_B = i_{SB} + i_{RB}. \quad (12)$$

Сумісному інтегруванню підлягає система диференціальних рівнянь електромеханічного стану (5), (8). Вхідними даними є: $r_S, r_R, \alpha_S, \alpha_R, p_0, J$, а також намагнетичувальна крива $\Psi_m(i_m)$, і вхідні сигнали: $U_m, \omega_0, M(\omega, t)$.

У випадку відсутності насичення ($\tau = \rho = \alpha_m$) матриця коефіцієнтів рівняння (9) значно спрощується

$$A = \frac{1}{3d_0} \begin{bmatrix} 2 & 1 & -3c_0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -3c_0 \\ -2c_0 & c_0 & 3l_{33}d_0 + c_0^2 & -4c_0 \\ c_0 & -c_0 & 0 & 3l_{33}d_0 + c_0^2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де

$$\begin{aligned} l_{11} &= \frac{1}{\alpha_m} + \frac{1}{\alpha_S}; \quad l_{33} = \left(\frac{1}{\alpha_m} + \frac{1}{\alpha_R}\right)^{-1}; \\ d_0 &= l_{11} - \frac{c_0}{\alpha_m}; \quad c_0 = \frac{1}{\alpha_m} \left(\frac{1}{\alpha_m} + \frac{1}{\alpha_R}\right)^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТИ СИМУЛЯЦІЇ

Результати сумісного інтегрування (5), (8), ілюструють часові залежності кутової швидкості, фазного струму статора і намагнетичувального струму ненавантаженого модельного асинхронного конденсаторного мотора в одному із перехідних процесів, які показані на рис. 1-4.

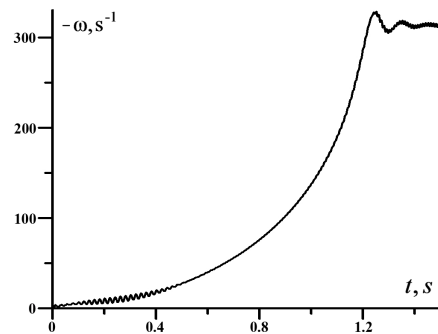


Рис. 1. Залежність $-\omega = -\omega(t)$ при запуску мотора

Параметри мотора: $r_S = 1.01$ Ом; $r_R = 1.80$ Ом; $\alpha_S = 65$ Гн⁻¹; $\alpha_R = 70$ Гн⁻¹; $\alpha_m = 4.73$ Гн⁻¹; $C = 50$ мкФ; $J = 0.025$ кгм²; $p_0 = 2$. Крива намагнетичування мотора апроксимована залежністю

$$\Psi_m(i_m) = \begin{cases} 0.215i_m, & \text{if } 0 \leq i_m \leq 2; \\ 0.2213i_m - 0.0026i_m^3 + 0.00002i_m^5, & \text{if } 2 < i_m < 7; \\ 0.043i_m + 0.7, & \text{if } 7 \leq i_m. \end{cases}$$

Замість кривої $\Psi_m(i_m)$ у пам'ять комп'ютера вводяться відповідні залежності статичної і диференціальної основних індуктивностей, які одержуємо згідно з аналітичними виразами (11).

Вхідні сигнали: $U_m = 310.5$ В, $\omega_0 = 314$ с⁻¹, $M(\omega, t) = 0.2$ Нм. Початкові умови – нульові.

Перехідний процес засвідчує успішний запуск мотора до усталеної робочої швидкості.

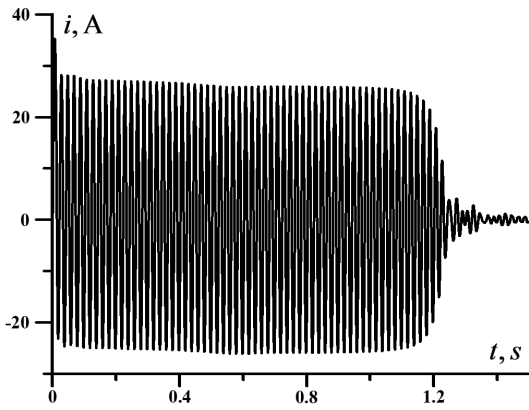


Рис. 2. Часова залежність струму статора $i_{SA} = i_{SA}(t)$ при запуску мотора

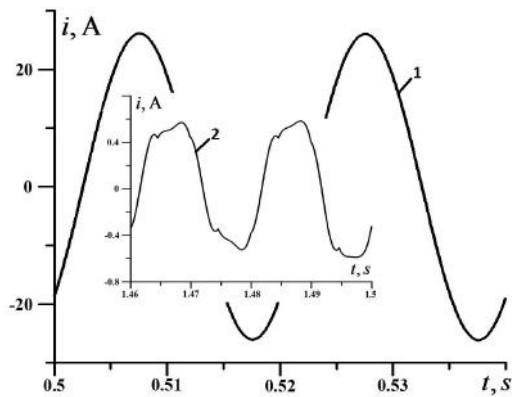


Рис. 3. Часові залежності струму $i_{SA} = i_{SA}(t)$ на часових інтервалах у $2T$: $[0,50-0,54]$ с (1) і $[1,46-1,50]$ с (2)

Криві рис. 3 статорного струму логічно вписуються в класичну теорію електричних машин. Згідно якої в процесі пуску машина є далека від насичення, що підтверджує синусоїдальність кривої струму (1). В усталеному стані, навпаки, проявляється ефект насичення, що спотворює, синусоїдальність струму, що презентує крива (2). Це переконливо засвідчують криві намагнечувального струму, що показані на рис. 4, якщо прийняти до уваги, що коліну кривої намагнечування відповідає значення струму, що дорівнює 2 А.

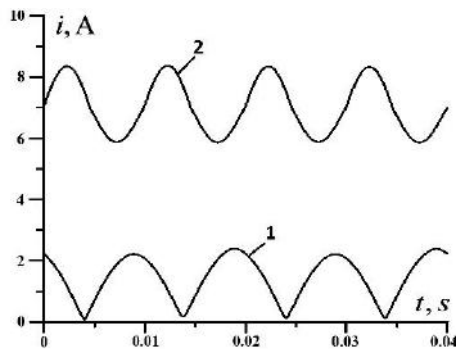


Рис. 4. Часові залежності струму $i_m = i_m(t)$ на часових інтервалах у $2T$: $[0,50-0,54]$ с (1) і $[1,46-1,50]$ с (2)

Звертаємо увагу, що при описаній схемі вмикання конденсатора мотор розганяється в зоні від'ємних кутових швидкостей ротора. Але та теоретична особливість не грає ніякої практичної ролі, бо для користувача це не принципово.

ВИСНОВКИ

1. Оскільки диференціальні рівняння математичної моделі однофазного стану насиченого трифазного асинхронного конденсаторного мотора представлені в нормальній формі Коші, то така модель є не тільки найзручнішою для реалізації її на комп'ютерній техніці, але й такою, що забезпечує найвищу точність числового інтегрування. А це дає можливість аналізувати тривалі перехідні процеси, що набирає принципного значення у випадку, коли мотор є елементом складної електромеханічної системи.

2. Як засвідчують результати комп'ютерної симуляції в роботі конденсаторного мотора значну роль відіграє явище насичення головного магнетного кола, тому цим ефектом нехтувати не допустимо.

3. Запропонована математична модель трифазного асинхронного мотора в однофазному стані легко адаптується на глибокопазні мотори, якщо її доповнити рівняннями квазістаціонарного електромагнетного поля, що описують поверхневий процес у пазовому просторі обмотки ротора [3].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чабан В.Й., Гоголь З.І. Математична модель трифазного асинхронного мотора в однофазному стані // Електротехніка й електромеханіка. – 2011. – № 3. – С. 43-45.
2. Чабан В.Й. Математичне моделювання електромеханічних процесів. – Львів, 1997. – 344 с.
3. Чабан В.Й. Математичне моделювання в електротехніці. – Л.: Вид-во Тараса Сороки, 2010. – 508 с.

Bibliography (transliterated): 1. Chaban V.J., Gogol' Z.I. Matematichna model' trifaznogo asinhronnogo motora v odnofaznomu stani // Elektrotehnika j elektromehanika. - 2011. - № 3. - S. 43-45. 2. Chaban V.J. Matematichne modelyuvannya elektromechanichnih procesiv. - L'viv, 1997. - 344 s. 3. Chaban V.J. Matematichne modelyuvannya v elektrotehnici. - L.: Vid-vo Tarasa Soroki, 2010. - 508 s.

Надійшла 28.07.2011

Чабан Василь Йосипович, д.т.н., проф.
Національний університет "Львівська політехніка"
й Ряшівський університет
79021, Львів, вул. Кульпарківська, 142, кв. 33.
тел: (067) 7202181, e-mail: vtchaban@polynet.lviv.ua

Костючко Сергій Миколайович
Національний університет "Львівська політехніка"
45500, Волинська обл., Локачинський р-н., смт. Локачі,
вул. Польова, 4
тел: (068) 5635757, e-mail: siriusk@mail.ru

Tchaban V.J., Kostyuchko S.M.

A mathematical model of a saturated three-phase condenser induction motor in a single-phase state.

The paper introduces a mathematical model of a saturated three-phase condenser induction motor with a condenser battery in one phase in a single-phase state. Differential equations of electromechanical state are given in normal Cauchy form. Results of computation are presented.

Key words – three phase saturated condenser induction motor, single-phase state, mathematical model.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ СТРУКТУРНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КЛАССОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Узагальнено результати геномних і еволюційних досліджень, що науково підтверджують існування генетичних програм структурної еволюції електромеханічних систем. На прикладі функціонального класу електромеханічних дезінтеграторів багатofакторної дії наведено результати ефективного використання генетичних програм в задачах структурного передбачення та інноваційного синтезу нових конкурентоспроможних зразків електромеханічного обладнання.

Обобщены результаты геномных и эволюционных исследований, которые научно подтверждают существование генетических программ структурной эволюции электромеханических систем. На примере функционального класса электромеханических дезинтеграторов многофакторного действия приведены результаты эффективного использования генетических программ в задачах структурного предвидения и инновационного синтеза новых конкурентоспособных образцов электромеханического оборудования.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие программы развития – фундаментальное свойство живых систем. Программы развития имеют генетическую природу, материализованную в структуре генома каждого живого организма. Поэтому, наличие собственной программы развития, до последнего времени, считалось уникальным свойством, отличающим живую систему от искусственной.

Открытие периодической системы электромагнитных элементов (первичных источников электромагнитного поля), которая одновременно является их генетической классификацией (ГК), и последующий анализ ее инвариантных свойств потребовало пересмотра традиционных представлений о принципах структурной организации и законах развития сложных систем природного и природно-антропогенного типа [1].

Результаты генетического и структурно-системного анализа ГК показали, что исторически сложившееся, необозримое множество электромагнитных и электромеханических объектов (ЭМ-объектов), созданных многими поколениями специалистов, обладает высокоупорядоченными системными связями, разнообразие и структурная организация которых раскрывается через генетическую информацию исходного элементного базиса ГК.

В процессе научного познания установлено, что указанная закономерность определяется свойствами целостных структур, элементарного и субэлементарного уровней, определяющих структурную организацию объектов и систем более высокого уровня сложности, образующихся в процессе структурной эволюции. Фундаментальность таких целостных структур определяется их инвариантностью к уровню сложности систем-потомков, реализуемых ими функций и времени их эволюции. Такими устойчивыми наследственными свойствами наделены, прежде всего, электроны (электромагнитные системы), атомы (химические соединения), гены (биологические системы) и звуки (музыкальные произведения).

Системными носителями исходного базиса порождающих структур являются периодические системы элементов, которые одновременно выполняют роль генетических классификаций первичных структур определенной физической природы.

В процессе разработки и проверки адекватности генетической теории эволюции электромеханических систем (ЭМ-систем) было научно доказано, что генетическая информация известного на данное время разнообразия ЭМ-объектов полностью согласуется с генетическими кодами конечного множества исходных элементов, представленных в периодической структуре ГК. С другой стороны, генетически определенные порождающие структуры элементного базиса ГК выступают в качестве источников структурного предвидения и направленного синтеза новых Видов и разновидностей ЭМ-объектов, еще отсутствующих на данное время эволюции [2, 3].

Стало очевидным, что создаваемое разнообразие объектов и систем электромагнитного происхождения генетически строго регламентировано и является результатом предсказуемой эволюции, элементный и информационный базис которой упорядочивается периодической структурой ГК.

Статья обобщает результаты исследований по определению геномно-эволюционного соответствия между элементным базисом ГК и структурным разнообразием создаваемых Человеком ЭМ-систем, на примере функционального класса электромеханических дезинтеграторов (ЭМД) многофакторного действия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходя из поставленной цели, в качестве основных задач исследования можно сформулировать следующие:

1. Осуществить структурное предвидение, т.е. определить генетически допустимое разнообразие и количественный состав Видов ЭМД;
2. По результатам патентно-информационного поиска определить известное структурное разнообразие ЭМД, идентифицировать их генетические коды (т.е. подтвердить наличие геномного соответствия между элементным базисом ГК и реальными ЭМ-объектами) и установить их видовую принадлежность (т.е. определить разнообразие и количество реально-информационных Видов ЭМД);
3. Определить количественный состав и генетическую структуру неявных Видов (т.е. Видов, еще отсутствующих на данное время эволюции класса ЭМД);
4. Осуществить направленный синтез новых структурных разновидностей ЭМД (из числа неявных Видов)

на макро- и микроуровнях и документально подтвердить их техническую новизну и конкурентоспособность.

Уникальность и сложность практической реализации поставленных задач определяется не только новой для технических наук методологией геномных и эволюционных исследований, но и необходимостью наличия определенного временного интервала, достаточного для последовательного решения поставленных задач и подтверждения корректности их решения.

Постановка системных задач такого уровня до последнего времени в технических науках отсутствовала. Поэтому, решение перечисленных задач, применительно к исследуемому классу ЭМ-систем, можно рассматривать как необходимое и достаточное условие доказательства выдвинутой авторами идеи направленности и научной предсказуемости структурной эволюции электромагнитных и электромеханических систем природно-антропогенного происхождения.

ПОНЯТИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ

Исходя из положений теории генетической эволюции ЭМ-систем [1], можно выделить два основных уровня представления генетических программ:

- макроэволюционный, определяющий элементное, таксономическое (видовое и родовое) и видовое разнообразие эволюционирующих классов ЭМ-объектов;

- микроэволюционный, содержащий программы структурообразования Видов ЭМ-систем (геномов, популяций и отдельных объектов), разнообразие электромагнитных и электромеханических структур (ЭМ-структур).

Программы макро- и микроуровневой генетически взаимосвязаны через эволюционные процессы видообразования ЭМ-объектов.

Правила перехода (синтеза) от элементного базиса ГК к объектам более высоких уровней структурной сложности определяются фундаментальным принципом сохранения генетической информации электромагнитной структуры. На основе анализа инвариантных свойств конечного множества порождающих элементов, определяющих структурное разнообразие электромагнитных и электромеханических систем, была научно обоснована генетическая природа Вида ЭМ-системы, что позволило определить уровни макро- и микроэволюции, установить границы видового разнообразия произвольных функциональных классов ЭМ-систем. Впервые установлена взаимосвязь структурных классов Порождающей системы с видовым разнообразием эволюционирующих ЭМ-систем (табл. 1).

Системный анализ указанных закономерностей позволил научно объяснить механизмы возникновения многочисленных параллелизмов и гомологий в структурно-функциональных классах, установить источники структурного разнообразия и выявить сходство и существенные различия в генетических программах и принципах структурообразования биологических и электромеханических преобразователей энергии.

Исследование генетического детерминизма в иерархии наследственных уровней "Электромагнитный ген" → "Электромагнитная хромосома" → "Электромагнитный объект" → "Популяция генетически род-

ственных объектов" → "Вид ЭМ-системы" → "Род" → "Функциональный класс ЭМ-систем" позволило разработать научные основы генетического синтеза популяционной структуры произвольных Видов ЭМ-систем по их генетическому коду [4, 5].

Таблица 1
Взаимосвязь элементного базиса Порождающей системы с эволюционирующими классами ЭМ-объектов

Уровни структурной организации ЭМ-систем	
Генетический (периодическая структура ГК)	Эволюционный
Элементы базового уровня	Базовые Виды
Элементы-изотопы	Виды-близнецы
Парные элементы	Виды-двойники
Элементы подгрупп	Гомологические ряды
Элементы малых периодов	Геометрические классы Роды ЭМ-объектов
Множество элементов, удовлетворяющих заданной $F_{ц}$	Функциональные классы ЭМ-объектов

Следующим важным этапом на пути познания генетических законов эволюции ЭМ-систем стало научное объяснение принципов кодирования генетической информации и установление детерминированной взаимосвязи периодической структуры ГК и универсального генетического кода с фундаментальными принципами сохранения электромагнитной структуры и законами эволюции (табл. 2).

Научное обоснование детерминированных взаимосвязей между периодической структурой ГК (периодами, группами, элементами), принципами сохранения электромагнитной симметрии и генетической информации (генетическими кодами) и законами развития структурного разнообразия электромагнитных и электромеханических объектов стало основой для разработки методологического базиса технологии структурного предвидения классов ЭМ-объектов, еще отсутствующих на данное время эволюции [2].

Таким образом, генетической программе определенного уровня или подуровня ставятся в соответствие конкретный носитель генетической информации, соответствующий аксиоматический и элементный базис, а также определенные классы высокоинтеллектуальных генетических моделей и методов направленного структурного синтеза. Следует отметить, что программы содержат исчерпывающую системную информацию как о реальных (известных) структурных классах ЭМ-систем, так и потенциально возможных, еще отсутствующих на данном этапе эволюции.

Исходя из изложенного, можно дать следующее определение: генетические программы представляют собой высокоупорядоченные информационные системы, определяющие инвариантные свойства элементного базиса и правила синтеза генетически допустимого разнообразия структур-потомков определенной физической или абстрактной природы, которые согласуются с результатами структурной эволюции, с одной стороны, и обеспечивают реализацию функции научного предвидения и направленного синтеза новых классов объектов, с другой.

Взаимосвязь генетически определенных уровней структурной организации со структурой ГК и результатами структурной эволюции ЭМ-систем

Уровень структурной организации	Порождающая система	Элементный базис	Принцип сохранения	ЭМ-системы-потомки
Макроэволюционный (системный)	Генетическая классификация первичных источников поля	Первичные источники электромагнитного поля (родительские электромагнитные хромосомы)	Электромагнитной симметрии Топологической инвариантности Принцип диссимметризации П. Кюри	Виды Функциональные классы Гомологические ряды
Микроэволюционный (Видовой)	Генетический код	Родительская хромосома	Генетической информации	Популяции ЭМ-объекты

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА МАКРОЭВОЛЮЦИИ

Информационным носителем программы макроэволюции ЭМ-систем выступает периодическая структура ГК. Уникальные системные образования естественного и абстрактного происхождения, упорядочивающие генетически определенные целостные структуры и представляющие собой форму отображения общесистемных законов структурной организации объектов естественного или природно-антропогенного происхождения, авторы обобщают понятием Порождающих периодических систем (Generative Periodical Systems).

Структура Порождающей системы упорядочивает разнообразие первичных источников электромагнитного поля и их генетические коды, которые в терминах генетической теории выполняют функцию родительских электромагнитных хромосом соответствующих Видов ЭМ-систем. Макропрограмма данного уровня содержит генетические подпрограммы структурообразования произвольных функциональных классов ЭМ-объектов, а также подпрограммы предвидения и синтеза гомологических рядов, Видов-близнецов, Видов-двойников, произвольных геометрических и топологических классов ЭМ-объектов. На макроуровне также определяется генетически допустимое разнообразие внутривидовых и межвидовых гибридных классов ЭМ-объектов [6].

В науках о живой природе программы макрогенетического уровня пока не обсуждаются по причине отсутствия Порождающей периодической системы биологических генетических кодов, поиск которой фактически не прекращается с момента открытия Д.И. Менделеевым периодической системы химических элементов.

Местоположение и упорядоченность первичных элементов в структуре ГК определяются принципами сохранения электромагнитной структуры: (в пределах групп), принципом топологической инвариантности (в пределах подгрупп) и принципом диссимметризации П. Кюри (в пределах малых периодов). Наличие указанных системных взаимосвязей обуславливает регулярность свойств элементов ГК, определяемую интегральным периодическим законом.

Проверка прогностических свойств генетической программы структурообразования на макроуровне осуществлялась по результатам структурного предвидения и направленного синтеза нового функционального подкласса однообмоточных ЭМД с электромаг-

нитной инверсией (табл. 3). Объектом исследования выступал новый класс генетически модифицированных структур однообмоточных ЭМД, целевая функция которых должна была удовлетворять следующей совокупности требований:

- 1) обладать свойствами гомологического ряда ЭМ-структур (требование генетического родства);
- 2) быть первыми структурными представителями неясных Видов-близнецов, отсутствующих на данное время эволюции класса (требование новизны Видов);
- 3) обладать новизной и конкурентоспособностью по отношению к известным представителям функционального класса ЭМД (требование технической новизны и полезности).

Решение поставленной задачи охватывало временной интервал более 30 лет и состояло из последовательного решения и экспериментального подтверждения ряда взаимосвязанных задач системного, инновационного и инженерного уровней.

На этапе системных исследований была осуществлена постановка задачи структурного предвидения и определена область существования класса. По результатам исследований была составлена макропрограмма генетически допустимого видового разнообразия нового класса однообмоточных ЭМД, функционирующих на принципе электромагнитной инверсии электромагнитных полей (табл. 3) [7]. Элементный базис нового класса представлен 68 родительскими хромосомами.

Предметом исследования второго этапа была задача определения состава реально-информационных и неясных Видов. Результаты патентного поиска показали, что структурные представители исследуемого класса ЭМД в эволюции отсутствуют, т.е. его видовая структура представлена только неясными Видами.

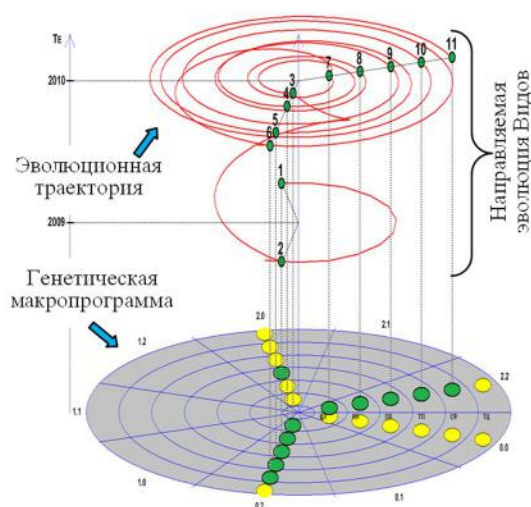
Это позволило определить непрерывные гомологические ряды и осуществить инновационный синтез первых структурных представителей из числа неясных Видов (в табл. 3 генетические коды синтезированных Видов-близнецов обозначены полужирным шрифтом на затемненном фоне).

На заключительном этапе выполнялась инженерно-конструкторская разработка новых образцов ЭМД и патентование новых конструктивных решений (табл. 4) [8-11].

Результаты макрогенетических исследований графически отображены в виде модели макроэволюции структурных представителей новых Видов ЭМД (рис. 1).

Генетическая программа видообразования однообмоточных электромеханических дезинтеграторов, функционирующих на принципе электромагнитной инверсии

ГРУППЫ		Подгруппы	ПЕРИОДЫ								
			у	х	у	х	у	х	у	х	
ГРУППЫ	0.0	Подгруппы	у	-	-	ПЛ 0.0у	-	-	-	-	-
			х	ЦЛ 0.0х	КН 0.0х	ПЛ 0.0х	ТП 0.0х	СФ 0.0х	-	-	-
			у	-	-	ПЛ 0.2у	-	-	-	-	-
	0.2		у	¹ ЦЛ 0.2у	¹ КН 0.2у	¹ ПЛ 0.2у	¹ ТП 0.2у	¹ СФ 0.2у	¹ ТЦ 0.2у		
				² ЦЛ 0.2у	² КН 0.2у	² ПЛ 0.2у	² ТП 0.2у	² СФ 0.2у	² ТЦ 0.2у		
				³ ЦЛ 0.2у	³ КН 0.2у	³ ПЛ 0.2у	³ ТП 0.2у	³ СФ 0.2у	³ ТЦ 0.2у		
	2.0	х	у	-	-	ПЛ 2.0х	-	-	-	-	
			х	¹ ЦЛ 2.0х	¹ КН 2.0х	¹ ПЛ 2.0х	¹ ТП 2.0х	¹ СФ 2.0х	¹ ТЦ 2.0х		
			² ЦЛ 2.0х	² КН 2.0х	² ПЛ 2.0х	² ТП 2.0х	² СФ 2.0х	² ТЦ 2.0х			
			³ ЦЛ 2.0х	³ КН 2.0х	³ ПЛ 2.0х	³ ТП 2.0х	³ СФ 2.0х	³ ТЦ 2.0х			
			2.2	у	¹ ЦЛ 2.2у	¹ КН 2.2у	¹ ПЛ 2.2у	¹ ТП 2.2у	¹ СФ 2.2у	¹ ТЦ 2.2у	
					² ЦЛ 2.2у	² КН 2.2у	² ПЛ 2.2у	² ТП 2.2у	² СФ 2.2у	² ТЦ 2.2у	
³ ЦЛ 2.2у	³ КН 2.2у	³ ПЛ 2.2у			³ ТП 2.2у	³ СФ 2.2у	³ ТЦ 2.2у				
2.2	х	¹ ЦЛ 2.2х	¹ КН 2.2х	¹ ПЛ 2.2х	¹ ТП 2.2х	¹ СФ 2.2х	¹ ТЦ 2.2х				
		² ЦЛ 2.2х	² КН 2.2х	² ПЛ 2.2х	² ТП 2.2х	² СФ 2.2х	² ТЦ 2.2х				
		³ ЦЛ 2.2х	³ КН 2.2х	³ ПЛ 2.2х	³ ТП 2.2х	³ СФ 2.2х	³ ТЦ 2.2х				
			ЦЛ	КН	ПЛ	ТП	СФ	ТЦ			

Рис. 1. Генетическая программа видообразования нового класса ЭМД и результаты ее направляемой эволюции (11 инновационных событий за время эволюции $T_E = 2$ года)

Эволюционная траектория направленной эволюции существенно отличается от эволюции наблюдаемой (традиционной). В качестве отличительных признаков генетически направляемой эволюции можно выделить следующие:

- взаимосвязь результатов генетического синтеза с генетическими кодами и структурой Порождающей системы (генетической программы);
- наличие генетического родства и возможность группового синтеза объектов;
- минимальное и прогнозируемое время структурной эволюции;
- высокая временная плотность реализуемых инновационных событий (если среднее время на открытие новых Видов асинхронных машин составляет 0,135 событий в год, то средние темпы направляемых инноваций в пределах класса ЭМД составили 5,5 событий в год);
- наличие гарантированного инновационного эффекта (в данном случае открыт класс ЭМД, 100% Видов которого относятся к категории неявных);
- возможность открытия новых Видов, еще не за-

действованных в структурной эволюции (по результатам исследований впервые введены в техническую эволюцию 11 новых Видов ЭМД, объединяемых 5 Родами);

- возможность реализации системного патентование ЭМ-объектов инновационной направленности (на заключительном этапе авторами была впервые реализована технология группового патентования ЭМ-объектов гомологическими рядами) [9, 11].

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ МИКРОЭВОЛЮЦИОННОГО УРОВНЯ

В соответствии с положениями теории генетической эволюции ЭМ-систем, первичным носителем генетической информации произвольного Вида ЭМ-системы является универсальный генетический код. Заключение в структуре кода генетической информация, совместно с операторами генетического синтеза (репликации $-f^R$, кроссингвера $-f^C$, мутации $-f^M$, пространственной $-f^I$ и электромагнитной $-f^E$ инверсии), определяют структуру геномов популяций произвольных Видов ЭМ-объектов, включая Видо-двойники, Видо-близнецы, а также неявные Видо.

Таким образом, исходные множества генетически модифицированных электромагнитных парных хромосом содержат программы структурного разнообразия объектов-потомков определенного Вида ЭМ-систем и определяют допустимые пределы изменчивости его популяционной структуры.

Инвариантность генетической информации порождающих хромосомных наборов ко времени эволюции и уровню научно-технического прогресса открывает возможность постановки задач структурного предвидения и последующего направленного синтеза ЭМ-структур, удовлетворяющих заданной функции цели на уровне геномов популяций произвольных Видов.

Корректность теоретических положений проверялась для доминирующего (наибольшего по численности созданных объектов) Вида плоских электромагнитноинверсных ЭМД с двухобмоточной активной зоной. Такие ЭМ-системы впервые были разработаны, запатентованы и выпускались серийно в ОКБ ЛЭД (г. Киев) с 1980 по 1991 гг. [12].

Результаты расшифровки структуры генома доминирующего Вида ПЛ 2.2x и его сопоставление с результатами микроэволюции двухобмоточных электромеханических дезинтеграторов ($T_3 = 30$ лет)

Хромосома	Генетическая информация и статус хромосомы	Генетическая формула	Наличие объектов-потомков
S_{00}	Родительская	ПЛ 2.2x	–
S_{11}	S_{00} совмещенная с ДФЧ, промежуточная	ПЛ 2.2x \times N(Fe, l/d)	–
S_{21}	S_{11} реплицированная по обмотке ($k_{R1} = 2$), промежуточная	2 ПЛ 2.2x \times N(Fe, l/d)	–
S_{31}	S_{21} пространственно инверсная (x-координата), промежуточная	2 (ПЛ 2.2x) ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	–
S_{41}	S_{31} электромагнитно инверсная, порождающая	2{ПЛ 2.2x:(\uparrow) _x } ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	16 (69,6%)
S_{50}	S_{41} мутированная, порождающая	2{ПЛ 2.2x:(\uparrow) _x M} ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	1 (4,3%)
S_{51}	S_{41} электромагнитно реплицированная по x-координате, порождающая	2{ПЛ 2.2x:(\uparrow) _x (\uparrow) _z } ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	4 (17,4%)
S_{521}	S_{41} реплицированная по обмотке (x-координата), порождающая (изомер)	k_{R1x} 2{ПЛ 2.2x: k_{Ex} (\uparrow) _x } ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	1 (4,3%)
S_{522}	S_{41} реплицированная по обмотке (y-координата), порождающая (изомер)	k_{R1y} 2{ПЛ 2.2x: k_{Ry} (\uparrow) _y } ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	Отсутствуют
S_{5221}	S_{522} электромагнитно инверсная (y-координата), порождающая (изомер)	k_{R1y} 2{ПЛ 2.2x: k_{Ry} (\uparrow) _y (\uparrow) _z } ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	Отсутствуют
S_{523}	S_{41} реплицированная по обмотке (z-координата), порождающая (изомер)	k_{R1z} 2{ПЛ 2.2x: k_{Rz} (\uparrow) _z } ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	Отсутствуют
S_{5231}	S_{523} электромагнитно инверсная (z-координата), порождающая (изомер)	k_{R1z} 2{ПЛ 2.2x: k_{Rz} (\uparrow) _z (\uparrow) _x } ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	Отсутствуют
S_{60}	S_{50} магнитно реплицированная (y-координата), порождающая	2{ПЛ 2.2x: k_{My} (\uparrow) _y M} ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	1 (4,3%)
S_{61}	S_{51} электромагнитно реплицированная (y-координата), порождающая	2{ПЛ 2.2x: k_{Ey} (\uparrow) _y } ⁻¹ \times N(Fe, l/d)	Отсутствуют

Генетической информации каждой порождающей хромосомы ставится в соответствие определенный тип популяций: реально-информационных или неявных.

Реально-информационные популяции отображают дискретные последовательности эволюционных событий (показаны на ветвях точками с указанием порядкового номера события, содержащегося в информационной базе данных), возникших за конкретное время эволюции T_3 и подтвержденных наличием реальных объектов-потомков или их описаний, представленных в виде проектов, патентов, статей и т.п. (популяции P_{41} , P_{50} , P_{51} , P_{60} , P_{5221}).

Популяции неявного Вида (P_{61} , P_{522} , P_{5221} , P_{523} , P_{5231} , которые на рис. 2 показаны пунктирными ветвями), содержат прогностическую, генетически определенную информацию о структурном потенциале разновидностей ЭМД, еще отсутствующих на данное время эволюции исследуемого Вида.

Результаты расшифровки генома Вида и анализ соответствий между структурой генома и последствиями его структурной эволюции за время T_3 (табл. 5), позволяют сделать следующие выводы:

- структурное разнообразие плоских ЭМД относится к классу генетически модифицированных объектов, представленных в геноме Вида хромосомными наборами 4 – 6 поколений;

- генетическая программа микроэволюции определяется хромосомным набором из 10 генетически модифицированных хромосом, 5 из которых выступают в качестве порождающих по отношению к известным эволюционным событиям (новшества), относящимся к исследуемому Вида, а остальные 5 содержат информацию о его скрытом структурном потенциале;

- плотность временного распределения эволюционных событий в структуре популяций неравномерна, что является отображением общесистемного принципа неравномерности развития генетически организованных систем: P_{41} – 69,6%; P_{50} – 4,3%; P_{51} – 17,4%; P_{521} – 4,3%; P_{60} – 4,3%;

- генетическая программа Вида в эволюционном плане далеко не исчерпана: 50% популяций отно-

сящихся к типу неявных, еще не задействованы в технической эволюции; три из 5 задействованных популяций представлены только по одному структурному представителю. Структура генома указанных популяций обладает большим прогностическим потенциалом и составляет основу для последующего анализа и направленного генетического синтеза новых разновидностей ЭМД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных авторами геномно-эволюционных исследований, с учетом масштабности их охвата (временной интервал составил более 30 лет, пространственный масштаб соответствовал уровню эволюционирующего функционального класса электромеханических систем), убедительно показывают, что генетические программы макро- и микроэволюционных уровней полностью согласуются с результатами технической эволюции созданных образцов ЭМД, что подтверждается результатами идентификации их генетических кодов и 100% соответствием с результатами геномного анализа.

Еще более веские доказательства существования программ развития в технических системах основываются на полученных авторами результатах системного предвидения нового класса однообмоточных ЭМД, разнообразие которых представлено 68 Видами неявного типа. По результатам инновационного синтеза гомологических рядов ЭМД, всего за два последних года, в техническую эволюцию планомерно вовлечены структурные представители 11 новых Видов, которые по итогам патентования приобрели статус реально-информационных. В реальных условиях такие эволюционные события происходят на временном интервале 80-100 лет.

Генетические программы необходимо рассматривать как объективную реальность, отображающую фундаментальные принципы структурной организации и генетическое разнообразие объектов в живой и неживой природе. Познание, разработка генетических банков инноваций и техническая реализация инновационного

потенциала генетических программ, в условиях растущей конкуренции и жестких ограничений на временные и материальные ресурсы, должно стать первоочередной задачей фундаментальной и прикладной науки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
2. Шинкаренко В.Ф. Уровни представления знаний и классы решаемых задач в технологии генетического предвидения // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 6. – С. 31-36.
3. Shynkarenko V. Genetic Foresight in Science and Technology: from Genetic Code to Innovative Project // 10th Anniversary International scientific Conference "Unitech'10". 19-20 November 2010. Gabrovo, Bulgaria. – Vol. III. – Bulgaria, 2010 – P. 297-302.
4. Шинкаренко В.Ф., Лысак В.В. Метод инновационного синтеза электромеханических объектов в поисковых задачах с нечеткой исходной информацией // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 5. – С. 34-38.
5. Шинкаренко В.Ф., Лысак В.В., Новикова М.М. Спрямований пошук та синтез гомологічних рядів однообмоткових електромеханічних дезінтеграторів багатofакторної дії з інверсними магнітними полями // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 1/2011 (13). – С. 63-67.
6. Шинкаренко В.Ф., Гайдаенко Ю.В. Генетические принципы структурообразования гибридных электромеханических систем // *Вісник КДУ ім. М. Остроградського*. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 3/2010 (62). Ч. 2. – С. 47-50.
7. Шинкаренко В.Ф., Лысак В.В. Принципы структурной организации электромеханических объектов с электромагнитной инверсией // *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах*. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 1/2011 (1). – С. 228-229.
8. Патент України на корисну модель № 43635, МПК (2009) N02K 41/025, V01F 13/00. Електромеханічний дезінтегратор / Шинкаренко В.Ф., Августинович А.А., Лысак В.В., Вахновецька М.О. Заявл. 25.03.2009, Опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
9. Патент України на корисну модель № 57139, МПК (2011.01) N02K 41/025, V01F 13/00. Електромеханічний дезінтегратор / Шинкаренко В.Ф., Шиманська А.А., Лысак В.В. Заявл. 28.07.2010, Опубл. 10.02.2011, Бюл. № 3.
10. Патент України на корисну модель № 43940, МПК (2009) N02K 41/025, V 01F 13/00. Електромеханічний пристрій для обробки матеріалів / Шинкаренко В.Ф., Шиманська А.А., Лысак В.В., Вахновецька М.О. Заявл. 03.04.2009, Опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17.
11. Патент України на корисну модель № 57384, МПК (2011.01) N02K 41/025, V 01F 13/08. Електромеханічний пристрій для обробки матеріалів / Шинкаренко В.Ф., Лысак В.В., Вахновецька М.О. Заявл. 28.07.2010, Опубл. 25.02.2011, Бюл. № 4.
12. Шинкаренко В.Ф., Попков В.С. Многоцелевые электромеханические преобразователи энергии с вихревой активной зоной и перспективы их использования в прогрессивных технологиях // *Тез. докл. научно-техн. конф. "Проблемы промышленности, электромех. систем и перспект. их развития"*, Ульяновск, 11-14 октября 1996 г. – Ч. 2. – Ульяновск, 1996. – С. 5-6.

Bibliography (transliterated): 1. Shinkarenko V.F. Osnovi teorii evolyucii elektromehaničnih sistem. - K.: Naukova dumka, 2002. - 288 s. 2. Shinkarenko V.F. Urovni predstavleniya znanij i klassy reshaemyh zadach v tehnologii geneticheskogo predvideniya // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2009. - № 6. - S. 31-36. 3. Shynkarenko V. Genetic Foresight in Science and Technology: from Genetic Code to Innovative Project // 10th Anniversary International scientific Conference "Unitech'10". 19-20 November 2010. Gabrovo, Bulgaria. - Vol. III. - Bulgaria, 2010 - P. 297-302. 4. Shinkarenko V.F. Lysak V.V. Metod innovacionnogo sinteza `elektromehaničeskikh ob`ektov v poiskovyh zadachah s nechetkoj ishodnoj informaciej // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2010. - № 5. - S. 34-38. 5. Shinkarenko V.F., Lisak V.V., Novikova M.M. Spryamovaniy poshuk ta sintez gomologičnih ryadiv odnoobmotkovykh elektromehaničeskikh dezintegratoriv bagatofaktornoї дії z inversnimi magnitnimi polyami // *Elektromehanični i energozberigayuchi sistemi*. - Kremenčuk: KNU, 2011. - Vip. 1/2011 (13). - S. 63-67. 6. Shinkarenko V.F., Gajdaenko Yu.V. Geneticheskie principy strukturoobrazovaniya gibridnyh `elektromehaničeskikh sistem // *Visnik KDU im. M. Ostrogradskogo*. - Kremenčuk: KDU, 2010. - Vip. 3/2010 (62). Ch. 2. - S. 47-50. 7. Shinkarenko V.F., Lysak V.V. Principy strukturoj organizacii `elektromehaničeskikh ob`ektov s `elektromagnitnoy inversej // *Problemi energoresursozberezheniya v elektrotehnicheskikh sistemah*. Nauka, osvita i praktika. Naukove vidannya. - Kremenčuk: KNU, 2011. - Vip. 1/2011 (1). - S. 228-229. 8. Patent Ukraїni na korisnu model' № 43635, MPK (2009) N02K 41/025, V01F 13/00. Elektromehaničnij dezintegrator / Shinkarenko V.F., Avgustinovich A.A., Lisak V.V., Vahnov'ca M.O. Zayavl. 25.03.2009, Opubl. 25.08.2009, Byul. № 16. 9. Patent Ukraїni na korisnu model' № 57139, MPK (2011.01) N02K 41/025, V01F 13/00. Elektromehaničnij dezintegrator / Shinkarenko V.F., Shimans'ka A.A., Lisak V.V. Zayavl. 28.07.2010, Opubl. 10.02.2011, Byul. № 3. 10. Patent Ukraїni na korisnu model' № 43940, MPK (2009) N02K 41/025, V 01F 13/00. Elektromehaničnij pristrij dlya obrobki materialiv / Shinkarenko V.F., Shimans'ka A.A., Lisak V.V., Vahnov'ca M.O. Zayavl. 03.04.2009, Opubl. 10.09.2009, Byul. № 17. 11. Patent Ukraїni na korisnu model' № 57384, MPK (2011.01) N02K 41/025, V 01F 13/08. Elektromehaničnij pristrij dlya obrobki materialiv / Shinkarenko V.F., Lisak V.V., Vahnov'ca M.O. Zayavl. 28.07.2010, Opubl. 25.02.2011, Byul. № 4. 12. Shinkarenko V.F., Popkov V.S. Mnogocel'evye `elektromehaničeskie preobrazovateli `energii s vihrevoj aktivnoj zonoj i perspektivy ih ispol'zovaniya v progressivnyh tehnologiyah // *Tez. dokl. nauchno-tehn. konf. "Problemy promyshl. `elektromeh. sistem i perspekt. ih razvitiya"*, Ul'yanovsk, 11-14 oktyabrya 1996 g. - Ch. 2. - Ul'yanovsk, 1996. - S. 5-6.

Поступила 28.08.2011

*Шинкаренко Василь Федорович, д.т.н., проф.,
Лысак Виктория Владимировна*
Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт"
кафедра электромеханики
03056, Киев, пр. Победы, 37
тел. (044) 4068238, e-mail: svf46@voliacable.com

Shynkarenko V.F., Lysak V.V.

Genetic programs of structural evolution of functional classes of electromechanical systems.

Results of genomic and evolutionary research which scientifically confirm existence of genetic programs of structural evolution of electromechanical systems are generalized. With an example of a functional class of multifactor-action electromechanical disintegrators, efficient application of genetic programs in problems of structural prediction and innovative synthesis of new competitive standards of electromechanical equipment is shown.

Key words – generating periodic system, genetic program, genetic code, genetic prediction, directed structural evolution, electromechanical disintegrator.

М.И. Баранов, В.О. Лысенко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ПРИ ПРЯМОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ БОЛЬШИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Надані результати виконаних натурних експериментів по електродинамічному руйнуванню дослідних зразків "живої" і "мертвої" деревини сосни, що випробовують пряму дію сильноточного плазмового каналу іскрового розряду з великим імпульсним струмом штучної блискавки.

Приведены результаты выполненных натурных экспериментов по электродинамическому разрушению опытных образцов "живой" и "мертвой" древесины сосны, испытывающих прямое воздействие сильноточного плазменного канала искрового разряда с большим импульсным током искусственной молнии.

ВВЕДЕНИЕ

Для прогнозирования поведения при прямом ударе молнии (ПУМ) строительных деревянных элементов (траверс, стоек и др.) опор воздушных линий электропередачи (ЛЭП) и деревянных клееных конструкций (ДКК), определяющих несущую способность и изоляционные свойства ряда объектов высоковольтной импульсной техники (ВИТ) [1, 2], и дальнейшего изучения физико-механических процессов при ПУМ в деревянные насаждения парков и лесов [3] требуются как расчетные, так и опытные данные по электродинамической стойкости в воздушной атмосфере "живой" (растущей) и "мертвой" (срезанной) древесины различных пород к действию на нее больших импульсных токов (БИТ) линейной молнии. В настоящее время в области электроэнергетики и ВИТ вопросы, связанные со стойкостью указанной древесины к ПУМ, характеризующемуся протеканием в его плазменном канале искрового разряда импульсного тока амплитудой в десятки (сотни) килоампер при его длительности в десятки (сотни) микросекунд [4], исследованы слабо и недостаточно полно для подготовки и выдачи специалистам нормативно-технических и ремонтно-эксплуатационных служб соответствующих практических рекомендаций. Поэтому изучение механизмов разрушения при ПУМ "живой" и "мертвой" древесины хвойных пород, из которой обычно изготавливаются опоры ЛЭП и ДКК объектов ВИТ, и определение ее электродинамической стойкости к действию протекающих по ней БИТ, сопровождающих ПУМ в ее пористую структуру с трахеидами, заполненными в зоне камбия для "живой" древесины восходящими (нисходящими) соками (жидкими электролитами), а для "мертвой" древесины на ее периферии водосодержащими составами [2, 5], являются актуальными научно-техническими задачами в области техники и электрофизики высоких напряжений, больших токов, сильных электрических и магнитных полей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ РАЗРУШЕНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Полагаем, что в качестве испытываемых опытных образцов у нас будут выступать образцы "живой" и "мертвой" древесины сосны, размеры которых опреде-

ляются объемом имеющейся древесины и техническими возможностями высоковольтной испытательной установки, сильноточная разрядная цепь которой построена на основе генератора импульсной А-компоненты тока искусственной молнии (генератора импульсного тока ГИТ-А) [4, 6]. Пусть наружный диаметр опытных образцов древесины составляет $d_{\text{н}}=100$ мм, а их высота равна $h_{\text{н}}=50$ мм. Образцы "живой" древесины будем изготавливать на токарном станке из свежесрезанной непосредственно перед испытаниями сосны диаметром около 104 мм, а образцы "мертвой" древесины – из пролежавшего не менее шести месяцев в закрытом помещении при комнатной температуре ствола сосны аналогичного диаметра. Принимаем, что опытные образцы 2 древесины сосны в процессе электродинамических испытаний размещаются и жестко закрепляются в двухэлектродной системе (ДЭС) генератора ГИТ-А, состоящей из верхнего круглого массивного медного электрода 1 и нижнего плоского массивного алюминиевого электрода 4 размером $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$ (рис. 1). Для ввода сильноточного плазменного канала разряда от генератора ГИТ-А внутрь опытных образцов используем тонкий электрически взрывающийся проводник (ЭВП) 3 из меди.

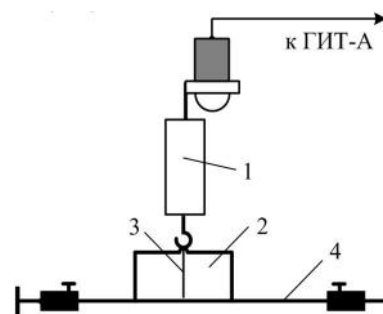


Рис. 1. Схематическое изображение ДЭС с опытным образцом древесины сосны в разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А для получения импульсной А-компоненты тока искусственной молнии (1 – верхний круглый массивный медный электрод ДЭС; 2 – круглый опытный образец древесины сосны; 3 – тонкий медный ЭВП; 4 – нижний плоский массивный алюминиевый электрод ДЭС)

Данный тонкий медный ЭВП (диаметром $d_{\text{п}}=0,2$ мм и длиной $l_{\text{п}}=50$ мм) будем размещать на периферии испытываемых опытных образцов древесины в

специально просверленном для него круглом продольном отверстии диаметром $d_0=3$ мм и длиной $l_0=50$ мм. На рис. 2 показан внешний вид размещения и закрепления в ДЭС генератора ГИТ-А опытного образца древесины сосны с принятыми габаритными размерами, а на рис. 3 – внешний вид самих испытываемых круглых образцов из "живой" и "мертвой" древесины сосны со сквозными отверстиями ($d_0=3$ мм и $l_0=50$ мм) на их периферии под размещение в них тонкого медного ЭВП, отстоящими по радиусу от боковой поверхности исследуемых образцов на расстоянии, равном 5 мм.



Рис. 2. Внешний вид перед испытанием ДЭС в разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А с жестко закрепленным в ней круглым испытательным образцом древесины сосны наружным диаметром $d_H=100$ мм и высотой $h_H=50$ мм

На рис. 4 приведена электрическая схема разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А, примененного нами при электродинамических испытаниях опытных образцов древесины сосны. В состав данной схемы генератора ГИТ-А входит генератор высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) на рабочее напряжение ± 100 кВ для запуска коммутатора F_1 .



Рис. 3. Внешний вид испытываемых цилиндрических опытных образцов "живой" (слева – вид "а") и "мертвой" (справа – вид "б") древесины сосны наружным диаметром $d_H=100$ мм и высотой $h_H=50$ мм с круглым сквозным отверстием на их периферии (диаметром $d_0=3$ мм и длиной $l_0=50$ мм) под вертикальную установку в него тонкого медного ЭВП

Основные собственные электрические параметры разрядной цепи генератора ГИТ-А (без учета параметров ДЭС) согласно рис. 4 имели следующие численные

значения [6, 7]: $C_A=333$ мкФ; $L_A=2,5$ мкГн; $R_A=0,057$ Ом; $L_T=0,4$ мкГн; $R_T=0,03$ Ом. При длине 0,36 м верхнего 1 медного электрода ДЭС величина индуктивности L_D будет примерно равной 0,41 мкГн. Активное сопротивление сплошной медной жилы диаметром 6,6 мм данного электрода ДЭС составляет 0,2 мОм, что позволяет пренебрегать его влиянием на электромагнитные процессы в разрядной цепи генератора ГИТ-А. Значение активного сопротивления R_D будет определяться электродинамическими процессами в плазменном канале искрового разряда, образуемом после наступления явления электрического взрыва тонкого медного ЭВП 3 ($d_{П}=0,2$ мм; $l_{П}=50$ мм), размещенного в сквозном продольном отверстии ($d_0=3$ мм; $l_0=50$ мм) испытываемого опытного образца "живой" или "мертвой" древесины сосны. Разделительная емкость C_P в схеме на рис. 4 принята равной 180 пФ.

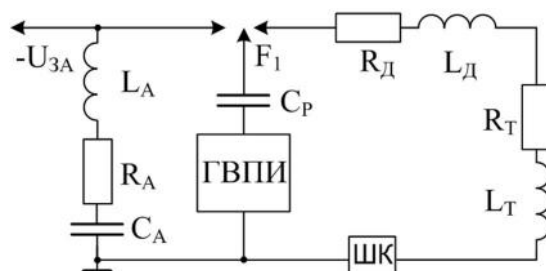


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А с ГВПИ и измерительным шунтом ШК, используемой при формировании на электрической нагрузке (на размещенном внутри испытательного образца древесины сосны тонком медном ЭВП) и сопротивлениях рабочего стола ГИТ-А (R_T и L_T) импульсной A - компоненты тока искусственной молнии [6, 7]

Полярность зарядного напряжения U_{3A} мощного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) генератора ГИТ-А (см. схему на рис. 4), как и полярность первых полуволн импульсного тока (однонаправленно движущихся зарядов в токовом канале при ПУМ) большинства линейных молний в воздушной атмосфере, выбиралась отрицательной, а его величина определялась условиями экспериментов. При измерении амплитудно-временных параметров (АВП) импульсных токов микросекундного временного диапазона, протекающих через тонкий медный ЭВП и соответственно вдоль полых микротрахей пористой макроскопической структуры опытных образцов древесины, был применен метрологически поверенный коаксиальный шунт (ШК) типа ШК-300, имеющий для импульсной A - компоненты тока искусственной молнии коэффициент преобразования, равный $K_A=11261$ А/В [6, 8].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗРУШЕНИЮ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

На рис. 5 представлены результаты воздействия импульсной A - компоненты тока искусственной молнии на опытный образец "живой" древесины сосны при зарядном напряжении генератора ГИТ-А, равном $U_{3A}=-10$ кВ. На рис. 6 приведена осциллограмма протекающего в этом случае по тонкому медному ЭВП и

опытному образцу "живой" древесины сосны разрядного тока генератора ГИТ-А, полученная при помощи измерительного шунта типа ШК-300 и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 (масштаб по вертикали – 2 В/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка). Согласно данным рис. 6 первая (наибольшая) отрицательная амплитуда имитированного в полевых лабораторных условиях импульсного тока молнии принимает значение, численно равное примерно $I_{mA}=5,84 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В}=65,7 \text{ кА}$. Отметим, что согласно рис. 6 этой токовой амплитуде I_{mA} соответствует время, равное $t_{mA}=34 \text{ мкс}$. Из данных рис. 5 видно, что при указанных значениях U_{3A} и I_{mA} происходит локальное разрушение испытываемого круглого деревянного образца из сосны. Проведенные эксперименты показали, что при меньших значениях зарядного напряжения U_{3A} ЕНЭ генератора ГИТ-А и соответственно первых амплитуд I_{mA} импульсной А-компоненты тока искусственной молнии разрушений (раскалывания) пористой структуры образцов "живой" древесины сосны не наблюдается. Кроме того, на рис. 5 рядом с опытным образцом испытываемой древесины хорошо виден оплавленный "след" (диаметром около $d_{A1}=46 \text{ мм}$) от воздействия на горизонтально расположенный нижний плоский алюминиевый электрод 4 ДЭС толщиной 2 мм плазменного канала искрового разряда с указанными АВП протекающего по нему импульсного тока искусственной молнии.



Рис. 5. Внешний вид нижней части ДЭС разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А, зоны разрушения и отдельных расколов током молнии элементов опытного образца "живой" древесины сосны диаметром $d_H=100 \text{ мм}$ и высотой $h_H=50 \text{ мм}$ при $U_{3A}=-10 \text{ кВ}$ и $I_{mA}=65,7 \text{ кА}$

На рис. 7 для сравнения с данными, соответствующими на рис. 6 АВП разрядного тока генератора ГИТ-А при локальном разрушении опытного образца

"живой" древесины сосны, приведена осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии в силовоточной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А по схеме рис. 4, разряжающегося только на размещенный в воздухе тонкий медный ЭВП 3 без наличия в ДЭС опытного образца 2 древесины сосны.

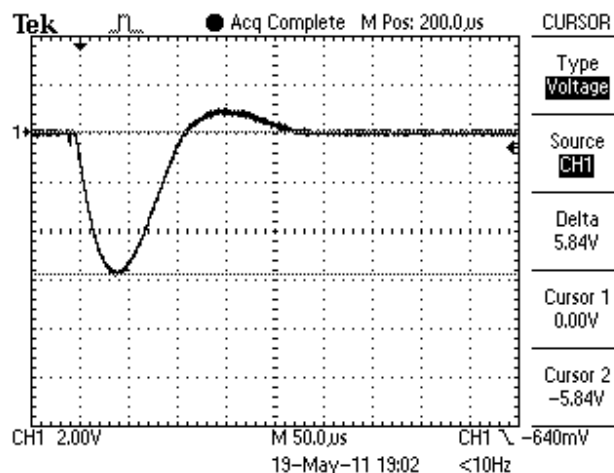


Рис. 6. Осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии при силовоточном разряде высоковольтного генератора ГИТ-А на тонкий медный ЭВП (диаметром $d_H=0,2 \text{ мм}$ и длиной $l_H=50 \text{ мм}$), вертикально установленный на воздухе в отверстии (диаметром $d_0=3 \text{ мм}$ и длиной $l_0=50 \text{ мм}$) локально разрушающегося опытного образца "живой" древесины сосны наружным диаметром $d_H=100 \text{ мм}$ и высотой $h_H=50 \text{ мм}$ ($U_{3A}=-10 \text{ кВ}$; $I_{mA}=65,7 \text{ кА}$)

Расшифровка осциллограммы воздействующего на опытный образец "живой" древесины сосны разрядного тока генератора ГИТ-А (см. рис. 6) показывает, что при периоде его колебаний $T_{A1}=215 \text{ мкс}$ амплитуда второй положительной полуволны рассматриваемой компоненты тока имитированной молнии принимает численное значение 10,4 кА, а амплитуда ее третьей отрицательной полуволны – около 1,6 кА.

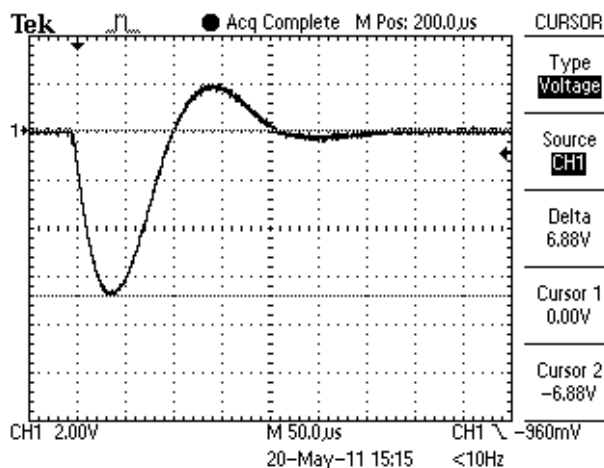


Рис. 7. Осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии при силовоточном разряде высоковольтного ГИТ-А на тонкий медный ЭВП (диаметром $d_H=0,2 \text{ мм}$ и длиной $l_H=50 \text{ мм}$), вертикально установленный на воздухе без опытного образца древесины сосны над горизонтально расположенным нижним плоским массивным алюминиевым электродом ДЭС ($U_{3A}=-10 \text{ кВ}$; $I_{mA}=77,4 \text{ кА}$)

В этой связи логарифмический декремент колебаний Δ_{A1} тока искусственной молнии в этом случае составит около 3,78, что при $T_{A1}=215$ мкс обуславливает численное значение коэффициента его затухания δ_{A1} , равное $17,6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. При суммарной индуктивности L_{AC} разрядной цепи генератора ГИТ-А в 3,31 мкГн и указанном значении δ_{A1} суммарное активное сопротивление R_{AC1} данной цепи будет равным 116,4 мОм. В результате при $R_A=57$ мОм и $R_T=30$ мОм опытное активное сопротивление R_{k1} сильноточного плазменного канала искрового разряда в опытном образце "живой" древесины сосны составит величину, равную 29,4 мОм. При удельной электропроводности γ_{k1} плазмы в сильноточном канале искрового разряда, характерного для импульсной А- компоненты тока искусственной молнии и используемого нами для электродинамических испытаний рассматриваемого образца древесины сосны, приблизительно равной $1625 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ [7] данному активному сопротивлению разрядного канала $R_{k1}=29,4$ мОм будет соответствовать расчетный максимальный радиус r_{k1} плазменного канала длиной $l_k=l_{\Pi}=h_{\Pi}=50$ мм внутри испытываемого круглого образца древесины сосны, составляющий согласно приведенным в [7, 9] оценочным соотношениям примерно 18,2 мм (при опытном радиусе на рис. 5 оплавленного "следа" на плоской поверхности нижнего алюминиевого электрода ДЭС под испытываемым образцом древесины примерно в $r_{A1}=23$ мм). Что касается осциллограммы разрядного тока генератора ГИТ-А, приведенной на рис. 7, то при амплитуде его первой отрицательной полуволны $I_{mA}=6,88 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В}=77,4 \text{ кА}$ ($t_{mA}=34$ мкс) амплитуда его второй положительной полуволны равна 20,3 кА, а третьей отрицательной полуволны – 3,4 кА. Поэтому при периоде колебаний $T_{A2}=210$ мкс этой кривой разрядного тока в цепи высоковольтного генератора ГИТ-А ($U_{3A}=-10$ кВ) соответствует коэффициент его затухания δ_{A2} , равный $14,9 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. При прежней суммарной индуктивности $L_{AC}=3,31$ мкГн разрядной цепи генератора ГИТ-А и указанном значении δ_{A2} суммарное активное сопротивление R_{AC2} в ней становится равным примерно 98,5 мОм. Такая величина R_{AC2} при $R_A=57$ мОм и $R_T=30$ мОм приводит к опытному значению активного сопротивления R_{k2} сильноточного плазменного канала искрового разряда в атмосферном воздухе (при его комнатной температуре в 20 °С), численно составляющему примерно 11,5 мОм. Из представленных выше экспериментальных данных, соответствующих опытным осциллограммам импульсного тока в сильноточных плазменных каналах искровых разрядов согласно рис. 6 и 7, следует, что размещение исследуемого круглого опытного образца "живой" древесины сосны ($d_{\Pi}=100$ мм и $h_{\Pi}=50$ мм) в ДЭС цепи разряда ЕНЭ генератора ГИТ-А приводит к внесению в нее (эту цепь) дополнительного активного сопротивления $(R_{k1}-R_{k2})=(29,4-11,5) \text{ мОм}=17,9 \text{ мОм}$. При длине сильноточного плазменного канала искрового разряда в опытном образце "живой" древесины сосны, равной $l_k=l_{\Pi}=h_{\Pi}=50$ мм, этому дополнительному активному сопротивлению в цепи разряда ГИТ-А будет соответствовать его погонное активное сопротивление,

составляющее до $17,9 \text{ мОм}/50 \text{ мм}=0,36 \text{ мОм}/\text{мм}$.

На рис. 8 представлены результаты воздействия импульсной А- компоненты тока искусственной молнии на опытный образец "мертвой" древесины сосны при зарядном напряжении генератора ГИТ-А, равном $U_{3A}=-7$ кВ. Данному значению напряжения U_{3A} соответствует осциллограмма разрядного тока ГИТ-А в образце указанной древесины, приведенная на рис. 9.

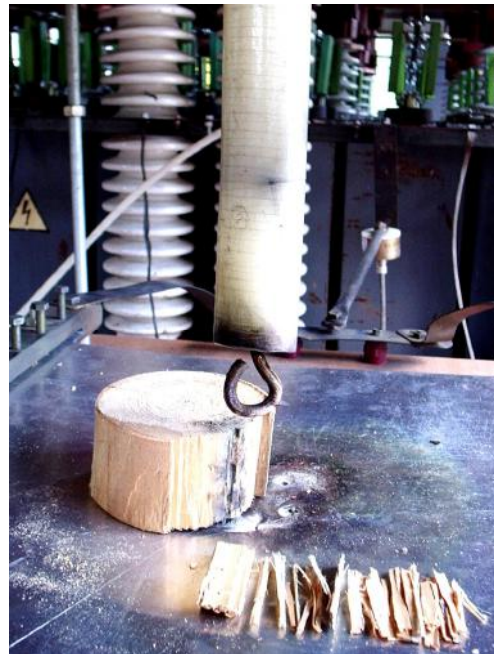


Рис. 8. Внешний вид нижней части ДЭС разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А, зоны разрушения и отдельных расколотых током молнии элементов опытного образца "мертвой" древесины сосны диаметром $d_{\Pi}=100$ мм и высотой $h_{\Pi}=50$ мм при $U_{3A}=-7$ кВ и $I_{mA}=41,4$ кА

Выполненные нами эксперименты показали, что при меньших значениях напряжения U_{3A} опытные образцы "мертвой" древесины сосны не разрушаются.

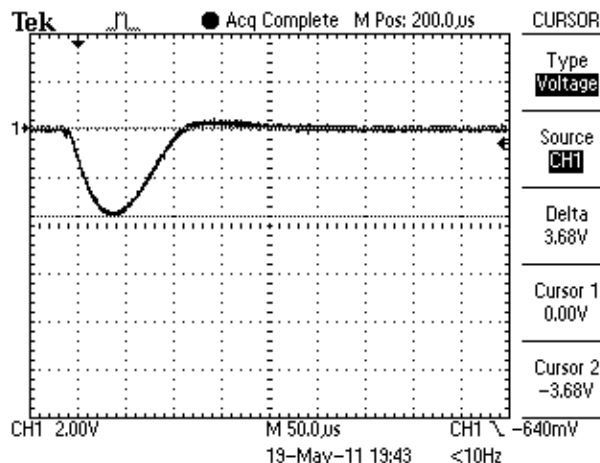


Рис. 9. Осциллограмма импульсной А- компоненты тока искусственной молнии при сильноточном разряде ГИТ-А на тонкий медный ЭВП (диаметром $d_{\Pi}=0,2$ мм и длиной $l_{\Pi}=50$ мм), вертикально установленный на воздухе в отверстии диаметром $d_0=3$ мм и длиной $l_0=50$ мм локально разрушающегося образца "мертвой" древесины сосны диаметром $d_{\Pi}=100$ мм и высотой $h_{\Pi}=50$ мм ($U_{3A}=-7$ кВ; $I_{mA}=41,4$ кА)

На рис. 10 показана осциллограмма импульсного тока разряда в цепи генератора ГИТ-А при $U_{3A} = -7$ кВ, содержащей лишь расположенный на воздухе медный ЭВП 3 (без наличия в ДЭС образца древесины 2). Отметим, что на рис. 9 и 10 использованы прежние, как и на рис. 6 и 7, масштабы по вертикали – 2 В/клетка и по горизонтали – 50 мкс/клетка. Согласно данным рис. 9 кривая разрядного тока в сильноточном плазменном канале, электродинамическим путем локально разрушающем (раскалывающем) образец из "мертвой" древесины сосны, приближается к апериодическому режиму. При периоде колебаний $T_{A3} = 210$ мкс и логарифмическом декременте колебаний Δ_{A3} , численно составляющим 3,94, импульсный ток разряда генератора ГИТ-А характеризуется коэффициентом затухания δ_{A3} , примерно равным $18,7 \cdot 10^3$ с⁻¹. Для суммарной индуктивности сильноточной электрической цепи разряда высоковольтного ГИТ-А в $L_{AC3} = 3,31$ мкГн такая величина δ_{A3} определяет ее опытное суммарное активное сопротивление, равное $R_{AC3} = 123,8$ мОм. Тогда при $R_A = 57$ мОм и $R_T = 30$ мОм из осциллограммы тока на рис. 9 следует, что опытное значение вносимого в разрядную цепь ГИТ-А активного сопротивления R_{k3} развивающимся в образце "мертвой" древесины сосны плазменным каналом составляет 36,8 мОм, что при удельной электропроводности каналной плазмы до $\gamma_{k2} = 1625$ (Ом·м)⁻¹ [7] обуславливает его расчетный радиус согласно [7, 9] примерно в 16,3 мм (при опытном радиусе оплавленного "следа" на плоской поверхности нижнего алюминиевого электрода ДЭС под испытываемым образцом древесины сосны в соответствии с данными рис. 8 и 11 около $r_{A2} = 19$ мм).

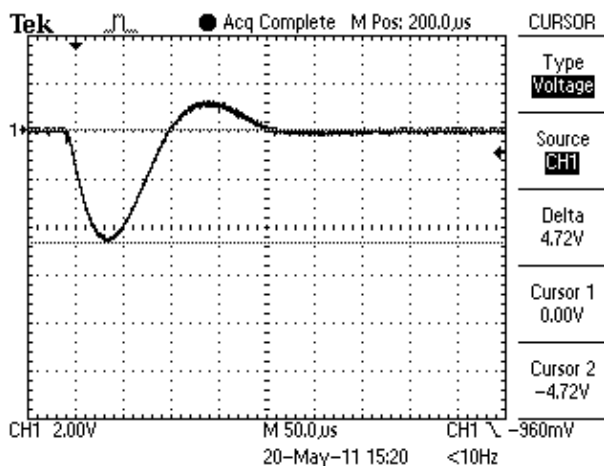


Рис. 10. Осциллограмма импульсной А- компоненты тока искусственной молнии при сильноточном разряде высоковольтного ГИТ-А на тонкий медный ЭВП диаметром $d_{\Gamma} = 0,2$ мм и длиной $l_{\Gamma} = 50$ мм, вертикально установленный на воздухе без опытного образца древесины сосны над горизонтально расположенным нижним плоским массивным алюминиевым электродом ДЭС ($U_{3A} = -7$ кВ; $I_{mA} = 53,1$ кА)

Из расшифровки токовой осциллограммы на рис. 10 получаем, что в этом случае разрядный ток генератора ГИТ-А характеризуется периодом колебаний $T_{A4} = 210$ мкс и логарифмическим декрементом колебаний, примерно равным $\Delta_{A4} = 3,27$. В этой связи при прежнем значении в цепи разряда ЕНЭ используемого

генератора ГИТ-А суммарной индуктивности $L_{AC} = 3,31$ мкГн коэффициент затухания импульсного тока принимает численное значение около $15,6 \cdot 10^3$ с⁻¹. Поэтому здесь опытное суммарное активное сопротивление R_{AC4} в разрядном контуре ГИТ-А будет приближенно составлять 103,1 мОм, что при неизменных значениях $R_A = 57$ мОм и $R_T = 30$ мОм определяет активное сопротивление R_{k4} плазменного канала воздушного искрового разряда в ДЭС, равное примерно 16,1 мОм. В результате этого размещение исследуемого цилиндрического опытного образца "мертвой" древесины сосны ($d_{\Gamma} = 100$ мм и $h_{\Gamma} = 50$ мм) в ДЭС разрядной цепи мощного ЕНЭ генератора ГИТ-А приводит к внесению в данную цепь дополнительного активного сопротивления $(R_{k3} - R_{k4}) = (36,8 - 16,1)$ мОм = 20,7 мОм. С учетом этого количественного результата при заданной длине (высоте) опытных образцов "мертвой" древесины сосны ($h_{\Gamma} = 50$ мм) дополнительное погонное активное сопротивление, вносимое исследуемой древесиной в электрическую цепь протекания импульсной А- компоненты тока искусственной молнии, численно составит около $20,7$ мОм/50 мм = 0,41 мОм/мм.

На рис. 11 приведены внешние виды округлых зон поверхностного оплавления плоского алюминиевого электрода ДЭС, полученных при помощи генератора ГИТ-А и его сильноточных плазменных каналов искровых разрядов, локально разрушающих по всей длине (высоте) исследуемые образцы "живой" и "мертвой" древесины сосны в области их периферии.



Рис. 11. Внешний вид двух округлых зон оплавления и деформации горизонтально расположенного нижнего плоского алюминиевого электрода ДЭС толщиной 2 мм от воздействия на него вертикально ориентированных сильноточных плазменных каналов тока искусственной молнии (слева – диаметром до $d_{A1} = 46$ мм при разрушении "живой" древесины сосны и $I_{mA} = 65,7$ кА, а справа – диаметром до $d_{A2} = 38$ мм при разрушении "мертвой" древесины сосны и $I_{mA} = 41,4$ кА)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальным путем при помощи уникального низкоомного высоковольтного генератора БИТ, размещенного на экспериментальной базе НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", впервые для цилиндрических опытных образцов "живой" и "мертвой" древесины сосны определены критические амплитудные значения импульсной А- компоненты тока искусственной молнии (соответственно величины $I_{mK1} = 65,7$ кА и $I_{mK2} = 41,4$ кА), вызывающие при ее прямом воздействии на макроструктуру исследуемой древесины, содержащую множество природно скрепленных (склеенных) между собой лигнином продольно ориентированных вдоль указанных образцов древесины микротрахеид, электродинамическое локальное раз-

рушение древесины сосны путем ее раскалывания. Установлено, что "живая" древесина сосны по сравнению с "мертвой" древесиной сосны характеризуется более высокими показателями ($I_{mK1} > I_{mK2}$) своей электродинамической стойкости к прямому действию на нее БИТ, сопровождающих протекание импульсной *A*-компоненты тока искусственной молнии.

2. Показано, что размещение опытных образцов "живой" и "мертвой" древесины сосны в ДЭС высоковольтной разрядной цепи низкоомного высоковольтного генератора ГИТ-А, имитирующего в полевых лабораторных условиях импульсную *A*-компоненту тока искусственной молнии, приводит к внесению в данную электрическую цепь импульсного источника энергии дополнительного активного сопротивления, численно составляющего по отношению к единице длины (высоты) испытываемых образцов древесины сосны погонную величину до 0,41 мОм/мм.

3. Пористая макрокопическая структура опытных образцов "живой" и "мертвой" древесины сосны вызывает определенное поперечное радиальное стягивание (уменьшение площади поперечного сечения не менее чем на 25 %) высоковольтного плазменного канала искрового разряда, привязываемого к их торцевой поверхности и продольно развивающегося вдоль их внутренней структуры, построенной на основе прилегающих друг к другу полых микротрахеид.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудаков В.В., Недзельский О.С. Исследование импульсной электрической прочности крупногабаритных клееных деревянных конструкций // Вестник ХПИ. Серия "Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок". – Харьков: ХПИ. – 1993. – Вып. № 18. – С. 73-77.
2. Баранов М.И., Лысенко В.О. Приближенные модели электродинамического разрушения древесины в атмосферном воздухе под действием прямого удара в нее линейной молнии // Вісник НТУ "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2009. – № 39. – С. 10-18.
3. <http://ru.wikipedia.org/wiki/молния>.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во "Точка", 2010. – 407 с.
5. Баранов М.И., Лысенко В.О. Явление высоковольтного электроосмоса в капиллярах "живой" древесины. Гипотеза возникновения и расчетная оценка // Вісник НТУ "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2010. – № 18. – С. 26-33.
6. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81-85.
7. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Лысенко В.О. Экспериментальное определение активного сопротивления и электропроводности высоковольтного плазменного канала в разрядной цепи генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 3. – С. 51-55.
8. 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 // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 2. – С. 46-55.
9. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Лысенко В.О. и др. Экспериментальная оценка электрического сопротивления и электропроводности высоковольтного плазменного канала в цепи разряда мощного генератора тока искусственной молнии // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 61-64.

Bibliography (transliterated): 1. Rudakov V.V., Nedzel'skij O.S. Iščledovanie impul'snoj `elektricheskoj prochnosti krupnogabaritnyh kleenyh derevyannyh konstrukcij // Vestnik HPI. Seriya "Elektro`energetika i avtomatizacija `energoustanovok". – Har'kov: HPI. – 1993. – Vyp. № 18. – S. 73-77. 2. Baranov M.I., Lysenko V.O. Priblizhennye modeli `elektrodinamicheskogo razrusheniya drevesiny v atmosfernom vozduhe pod dejstviem pryamogo udara v nee linejnoy molnii // Visnik NTU "HPI". Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. - Harkiv: NTU "HPI". – 2009. – № 39. – S. 10-18. 3. <http://ru.wikipedia.org/wiki/molniya>. 4. Baranov M.I. Izbrannye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 2: Teoriya `elektrofizicheskikh `effektov i zadach. – Har'kov: Izd-vo "Tochka", 2010. – 407 s. 5. Baranov M.I., Lysenko V.O. Yavlenie vysokovol'tnogo `elektroosmosa v kapillyarah "zhivoj" drevesiny. Gipoteza vozniknoveniya i raschetnaya ocenka // Visnik NTU "HPI". Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. - Harkiv: NTU "HPI". – 2010. – № 18. – S. 26-33. 6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka iskusstvennoj molnii dlya naturnyh ispytanij tehniceskikh ob'ektov // Pribory i tehnika `eksperimenta. – 2008. – № 3. – S. 81-85. 7. Baranov M.I., Koliushko G.M., Lysenko V.O. `Eksperimental'noe opredelenie aktivnogo soprotivleniya i `elektroprovodnosti sil'notochnogo plazmennogo kanala v razryadnoj cepi generatora impul'snoj komponenty toka iskusstvennoj molnii // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – № 3. – S. 51-55. 8. Baranov M.I., Kravchenko V.I., Nosenko M.A. `Eksperimental'nye issledovaniya `elektrotermicheskoj stojkosti metallicheskikh `elementov letatel'nogo apparata k pryamomu vozdejstviyu toka iskusstvennoj molnii. Chast' 2: Stojkost' mednyh provodov i kabelej // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – № 2. – S. 46-55. 9. Baranov M.I., Koliushko G.M., Lysenko V.O. i dr. `Eksperimental'naya ocenka `elektricheskogo soprotivleniya i `elektroprovodnosti sil'notochnogo plazmennogo kanala v cepi razryada moschnogo generatora toka iskusstvennoj molnii // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – № 1. – S. 61-64.

Поступила 30.09.2011

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,
Лысенко Виталия Олеговна
НИПКИ "Молния"
Национального технического университета
"Харьковский политехнический институт"
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47
тел. (057) 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I., Lysenko V.O.

Experimental research on pine wood samples destruction under direct action of artificial lightning heavy pulse currents.

The paper presents results of full-scale experiments on electrodynamic destruction of "living" and "dead" pine wood samples under direct action of heavy-current plasma channel of a spark discharge with artificial lightning heavy pulse currents.

Key words – pine wood, artificial lightning, heavy pulse current, destruction.

СОГЛАСУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО "ДИСКОВОГО" ТИПА

У рамках статті проведено аналіз електродинамічних процесів в узгоджувальному пристрої "дискового типу". Виконано обчислення коефіцієнта трансформації струму – основної електродинамічної характеристики розглянутого узгоджувального пристрою. Отримані результати проілюстровані чисельними оцінками для реальних ситуацій у практиці МІОМ.

В рамках статті проведено аналіз електродинамічних процесів в согласующем устройстве "дискового" типа. Произведено вычисление коэффициента трансформации тока – основной электродинамической характеристики рассматриваемого согласующего устройства. Полученные результаты проиллюстрированы численными оценками для реальных ситуаций в практике МИОМ.

ВВЕДЕНИЕ

В практике магнитно-импульсной обработки металлов для повышения эффективности силового воздействия на обрабатываемые объекты применяются, так называемые, согласующие устройства различного конструктивного исполнения (например, дисковые плоские, цилиндрические коаксиальные и др.) [1].

Согласующим устройством "дискового" типа является импульсный трансформатор тока, первичная обмотка которого выполнена в виде плоского многовиткового соленоида, размещённого между двумя идентичными проводящими компланарными дисками с одинаковыми радиальными разрезами. Диски являются вторичной обмоткой, к которой на краях разрезов подключается нагрузка.

Практическая работоспособность предлагаемого преобразователя определяется его геометрией, электрофизическими характеристиками конструктивных составляющих и амплитудно-временными параметрами токового импульса в первичной обмотке. Данное утверждение следует из феноменологических соображений и подтверждается выводами работ [2, 3], где исследованы процессы возбуждения вихревых токов в плоском металлическом листе магнитным полем одновиткового соленоида.

Цель настоящей работы – вычисление основной электродинамической характеристики согласующего устройства "дискового" типа – коэффициента трансформации тока, определяющего действенность и эффективность работы рассматриваемого устройства в целом.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Решение поставленной задачи выполним аналогично тому, как это было сделано в работах [2-4].

Для анализа электромагнитных процессов примем расчётную модель в цилиндрической системе координат, показанную на рис. 1. ($\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ – направляющие орты).

При решении задачи примем следующие допущения:

- распределения плотности тока в первичной обмотке – 1 (плоская многовитковая катушка, число витков – w , внутренний радиус – R_1 , внешний – R_2 , толщина – g) принимаем равномерным;
- конструктивное исполнение первичной обмотки таково, что она "прозрачна" для действующих полей ($g \rightarrow 0$), и не влияет на протекающие электромагнитные процессы;
- наличием радиальных разрезов в дисках согласно хорошо известной практике МИОМ [1, 4] можно пренебречь и считать, что имеет место аксиальная симметрия ($\partial/\partial\varphi = 0$, φ – азимутальный угол) и

симметрия системы относительно плоскости первичной обмотки $z = 0$;

- диски – 2 и 3 – одинаковы, выполнены из немагнитных листовых металлов толщиной d и электропроводностью γ с достаточно большими поперечными размерами, они расположены на одинаковом расстоянии от витка индуктора – h ;
- амплитудно-временные параметры тока в первичной обмотке $I(t)$ таковы, что справедливо квазистационарное приближение по Ландау: $\omega \cdot l/c \ll 1$, ω – циклическая частота, c – скорость света в вакууме, l – характерный размер системы.

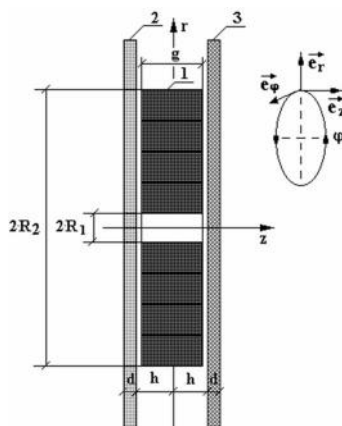


Рис. 1. Расчётная модель: 1 – первичная обмотка, плоский многовитковый соленоид; 2, 3 – вторичная обмотка, проводящие диски

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z); \end{array} \right. \quad (3)$$

где p – параметр преобразования Лапласа; $E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\}$; $H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\}$; $j_\varphi(p, r, z) = L\{j_\varphi(t, r, z)\}$; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

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

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

где $j_{\varphi i}(t, r, z)$ – плотность стороннего тока в первичной обмотке

$$j_{\varphi i}(p, r, z) = \frac{j(p)}{g} f(r) \cdot \eta(0.5g - |z|) \approx j(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z);$$

$j(p)$ – линейная плотность тока

$$j(p) = \frac{I(p) \cdot w}{(R_2 - R_1)};$$

$\delta(z)$ – Дельта-функция Дирака; $f(r)$ – функция однородного радиального распределения тока в первичной обмотке, $f(r) = \eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)$; $\eta(z)$ – ступенчатая функция Хевисайда; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

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

Геометрическая и электродинамическая симметрия исследуемой системы (соответственно рис. 1) позволяет считать, что таковыми являются:

- а) пространство между дисками $z \in [-h, h]$;
- б) область металла идентичных дисков $z \in [h, (h + d)]$;
- в) свободное полупространство с внешней стороны дисков $z \in [(h + d), \infty)$.

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

В пространстве между металлическими дисками $z \in [-h, h]$, получаем, что

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

$$\approx \mu_0 \cdot p \cdot j_{\varphi i}(p, r, z).$$

В металле дисков $z \in [h, (h + d)]$

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

$$-(p \cdot \gamma \cdot \mu_0) \cdot E_\varphi(p, r, z) = 0.$$

Вне системы $z \in [(h + d), \infty)$

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

Условию ограниченности радиального распределения $E_\varphi(p, r, z)$ из уравнений (5) – (7) при $r = 0$ и $r = \infty$ удовлетворяет интегральное преобразование Фурье-Бесселя [5]

$$E_\varphi(p, r, z) = \int_0^\infty E_\varphi(p, \lambda, z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot \lambda \cdot d\lambda, \quad (8)$$

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

В соответствии с (8) уравнения (5) – (7) приводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям второго порядка [4]:

а) в пространстве между дисками, $z \in [-h, h]$

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

где $K(p, \lambda) = \mu_0 j(p) f(\lambda)$; в соответствии с допущением о равномерном распределении тока в первичной обмотке –

$$f(\lambda) = \int_0^\infty f(r) \cdot r \cdot dr = \int_{R_1}^{R_2} J_1(\lambda \cdot r) \cdot r \cdot dr,$$

б) в металле дисков, $z \in [h, (h + d)]$

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

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

в) вне дисков, $z \in [(h + d), \infty)$

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

Общие интегралы уравнений (9) – (11) для выделенных областей имеют вид [5]:

а) в пространстве между дисками, $z \in [-h, h]$, условию симметрии относительно плоскости $z = 0$ удовлетворяет функция:

$$E_\varphi^{(1)}(p, \lambda, z) = C(p, \lambda) \cdot \text{ch}(\lambda z) + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \times$$

$$\times \left(\eta(z) \cdot \text{sh}(\lambda z) + 0.5 \cdot e^{-\lambda z} \right), \quad (12)$$

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

б) в металле дисков, $z \in [h, (h + d)]$:

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

$$+ D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot (z-h)}, \quad (13)$$

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

в) в пространстве вне системы, $z \in [(h + d), \infty)$, условию ограниченности при $z \rightarrow \infty$ удовлетворяет функция

$$E_\varphi^{(3)}(p, \lambda, z) = B(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda(z-(h+d))}, \quad (14)$$

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

Из уравнения (3) с помощью (12) – (14) находим тангенциальную компоненту напряжённости магнитного поля

а) $z \in [-h, h]$

$$H_r^{(1)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p\mu_0} \left[C(p, \lambda) \cdot \text{sh}(\lambda z) + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \times$$

$$\times \left(\eta(z) \cdot \text{sh}(\lambda z) + 0.5 \cdot e^{-\lambda z} \right),$$

б) $z \in [h, (h + d)]$

$$H_r^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{q(p, \lambda)}{p\mu_0} \left(D_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot (z-h)} -$$

$$- D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot (z-h)},$$

в) $z \in [(h + d), \infty)$

$$H_r^{(3)}(p, \lambda, z) = -\frac{\lambda}{p\mu_0} \cdot B(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda(z-(h+d))}. \quad (17)$$

Из условия непрерывности касательных компонент напряжённости электромагнитного поля на границах выделенных областей получаем системы алгебраических уравнений для определения неизвестных произвольных постоянных интегрирования в выражениях (12) – (17).

$z = h$

$$\begin{cases} C(p, \lambda) \cdot \text{ch}(\lambda h) + \frac{K(p, \lambda)}{2\lambda} \cdot e^{\lambda h} = \\ = D_1(p, \lambda) + D_2(p, \lambda), \\ C(p, \lambda) \cdot \text{sh}(\lambda h) + \frac{K(p, \lambda)}{2\lambda} \cdot e^{\lambda h} = \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \times \\ \times (D_1(p, \lambda) - D_2(p, \lambda)), \\ z = h + d \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} D_1(p, \lambda)e^{q(p, \lambda)d} + D_2(p, \lambda)e^{-q(p, \lambda)d} = B(p, \lambda), \\ \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} (D_1(p, \lambda)e^{q(p, \lambda)d} - D_2(p, \lambda)e^{-q(p, \lambda)d}) = -B(p, \lambda). \end{cases} \quad (19)$$

В конечном итоге нас интересуют поля, возбуждаемые в металле экрана и заготовки.

Исключая $C(p, \lambda)$ и $B(p, \lambda)$ в системах линейных алгебраических уравнений (18) и (19), находим неизвестные произвольные постоянные интегрирования $D_1(p, \lambda)$ и $D_2(p, \lambda)$.

После соответствующих подстановок в формулы (13) и (16) и обратного преобразования Фурье-Бесселя записываем формулы для напряженностей возбуждаемого электромагнитного поля в терминах продольной пространственной переменной, связанной собственно с диском.

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, r, \zeta) = \frac{p\mu_0 j(p)}{2} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{G(p, \lambda)} \cdot (\text{sh}(q(p, \lambda)(\zeta - d)) - \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \text{ch}(q(p, \lambda)(\zeta - d))) \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (20)$$

где

$$G(p, \lambda) = \text{sh}(q(p, \lambda)d) \cdot [\text{sh}(\lambda h) + (q(p, \lambda)/\lambda)^2 \times \text{ch}(\lambda h)] + \text{ch}(q(p, \lambda)d) \cdot q(p, \lambda)/\lambda \cdot e^{\lambda h}.$$

$$H_r^{(2)}(p, r, \zeta) = \frac{j(p)}{2} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda) \cdot q(p, \lambda)}{G(p, \lambda)} \cdot (\text{ch}(q(p, \lambda)(\zeta - d)) - \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \text{sh}(q(p, \lambda)(\zeta - d))) \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (21)$$

С помощью выражений (4) и (20) вычисляем плотность вихревых токов, индуцированных в металле дисков

$$j_{\varphi}(p, r, \zeta) = \frac{\mu_0 \gamma (p \cdot j(p))}{2} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{G(p, \lambda)} \cdot (\text{sh}(q(p, \lambda)(\zeta - d)) - \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \text{ch}(q(p, \lambda)(\zeta - d))) \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (22)$$

Интересно отметить, что при низких частотах токового импульса в первичной обмотке, когда $|p\mu_0\gamma| \rightarrow 0$ и $q(p, \lambda) \approx \lambda$, выражение (22) переходит в формулу для плотности индуцированного тока в одиночном листе тонкостенного металла [1]. Идентичность зависимостей вихревых токов для одного и двух металлических листов объясняется тем, что, в случае достаточно низких частот возбуждаемых полей, взаимное влияние дисков становится весьма несущественным.

Интегрируя по толщине $\zeta \in [0, d]$, получаем радиальное распределение линейной плотности индуцированного тока в диске

$$J_{\varphi}(r, p) = -\frac{\mu_0 \gamma}{2} \int_0^{\infty} \frac{pj(p) \cdot A_1(p, \lambda)}{q(p, \lambda) \cdot G(p, \lambda)} f(\lambda) J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (23)$$

где

$$A_1(p, \lambda) = \left[1 - (\text{ch}(q(p, \lambda) \cdot d) + \frac{(q(p, \lambda) \cdot d)}{(\lambda \cdot d)}) \times \text{sh}(q(p, \lambda) \cdot d) \right].$$

Предельный переход в формуле (23) для достаточно больших зазоров между соленоидом и дисками (идеализация, $h \rightarrow \infty$) переходит в аналогичную зависимость, найденную для системы из плоского соле-

ноида над листовым металлом авторами работы [2].

Здесь так же, как и при понижении рабочих частот, "удаление" дисков от источника поля снижает их взаимное влияние на протекающие электромагнитные процессы для любых временных параметров возбуждаемых полей.

Интегрируя по радиусу $r \in [0, R]$, R – произвольный радиус окружности на диске, находим величину индуцированного тока в диске "условного" радиуса R

$$I_{\varphi}(R, p) = -\frac{\mu_0 \gamma}{2} \cdot \int_0^{\infty} \frac{p \cdot j(p) \cdot A_1(p, \lambda)}{q(p, \lambda) \cdot G(p, \lambda)} \cdot f(\lambda) \times \frac{(1 - J_0(\lambda \cdot R))}{\lambda} d\lambda. \quad (24)$$

В выражении (24) перейдем в пространство оригиналов.

Для вычисления особых точек подынтегральной функции произведение продольного волнового числа на толщину листовой заготовки представим как мнимую величину

$$(q(p, \lambda) \cdot d) = i \cdot \beta_k. \quad (25)$$

Подставляя (25) в знаменатель дроби выражения (24) и приравнявая его к нулю, получаем уравнение для величин β_k

$$(\text{sh}(\lambda h) - (\beta_k / (\lambda \cdot d))^2 \text{ch}(\lambda h)) \cdot \sin(\beta_k) + e^{\lambda h} (\beta_k / (\lambda \cdot d)) \cos(\beta_k) = 0, (\beta_k \neq 0). \quad (26)$$

После выполнения тождественных преобразований приводим (26) к виду, удобному для практического анализа

$$\text{tg}(\beta_k) = \frac{2}{\left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} - \frac{(\lambda d)}{\beta_k} \right) + \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} + \frac{(\lambda d)}{\beta_k} \right) e^{-2\lambda h}}. \quad (27)$$

Как следует из (27) и представления (25), особыми точками функции комплексного переменного под знаком интеграла в выражении (24) являются простые отличные от нуля полюсы $-p_k$

$$p_k = -\frac{1}{\tau} \cdot (\beta_k^2 + (\lambda \cdot d)^2), k = 1, 2, \dots, \quad (28)$$

где $\tau = \mu_0 \gamma d^2$ – характерное время диффузии поля в металл листовой заготовки.

Далее, в соответствии с теоремой об оригинале дробно-рациональной функции и с теоремой обращения свёртки из выражения (24) находим соответствующую временную зависимость

$$\frac{p \cdot j(p) \cdot A_1(p, \lambda, z)}{q(p, \lambda) \cdot G(p, \lambda)} \leftrightarrow \leftrightarrow \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d \cdot A_1(p, \lambda)}{i \beta_k \cdot \frac{dG(p, \lambda)}{dp}} \Bigg|_{p=p_k} \cdot \frac{dj(t)}{dt} * e^{p_k \cdot t}. \quad (29)$$

В конечном итоге, с использованием (29) после необходимых тождественных преобразований находим оригинал для индуцированного тока.

$$I_{\varphi}(R, t) = -\frac{1}{d} \cdot \int_0^{\infty} \frac{F_1(\beta_k, (\lambda d))}{F_2(\beta_k, (\lambda d), h)} f(\lambda) (1 - J_0(\lambda \cdot R)) / \lambda \times \times \frac{dj(t)}{dt} * e^{-\frac{\beta_k^2 + (\lambda d)^2}{\tau} t} d\lambda, \quad (30)$$

где

$$F_1(\beta_k, (\lambda d)) = 1 - \left(\cos(\beta_k) - \frac{\beta_k}{(\lambda d)} \sin(\beta_k) \right),$$

$$F_2(\beta_k, (\lambda d), h) = \cos(\beta_k) \cdot \left[\operatorname{sh}(\lambda h) - \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} \right)^2 \operatorname{ch}(\lambda h) + \frac{e^{\lambda h}}{(\lambda d)} \right] - \sin(\beta_k) \cdot \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} \right) \cdot \left[e^{\lambda h} + \frac{2 \operatorname{ch}(\lambda h)}{(\lambda d)} \right].$$

Интересно отметить существование очевидных предельных переходов в свёртке выражения (30).

$$\frac{dj(t)}{dt} * e^{-\frac{(\beta_k^2 + (\lambda d)^2)}{\tau} t} = \int_0^t \frac{dj(\zeta)}{d\zeta} \cdot e^{-\frac{(\beta_k^2 + (\lambda d)^2)}{\tau} (t-\zeta)} d\zeta =$$

$$= \begin{cases} j(t), \gamma \rightarrow \infty, \\ \frac{dj(t)}{dt}, \gamma \rightarrow 0. \end{cases}$$

В режиме резкого поверхностного эффекта ($\gamma \rightarrow \infty$) временная форма индуцированного и возбуждающего токов совпадают между собой. В режиме интенсивного проникновения поля ($\gamma \rightarrow 0$) индуцированный ток пропорционален производной возбуждающего тока.

Отмеченные предельные результаты полностью согласуются с выводами работ [2, 3]

Выражение (30) приведём к виду, удобному в практических вычислениях. Под знаком несобственного интеграла перейдём к новой безразмерной переменной интегрирования: $x = (\lambda d)$. Также выполним преобразование временной зависимости.

В практике МИОМ функция времени плотности тока индуктора, как правило, имеет вид экспоненциально затухающей синусоиды, т.е.

$$j(t) = j_m \cdot e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \cdot \sin \varphi,$$

где $j_m = \frac{I_m \cdot w}{(R_2 - R_1)}$ – амплитуда плотности тока,

I_m – амплитуда тока, δ_0 – относительный декремент затухания, $\varphi = \omega \cdot t$ – фаза, ω – циклическая частота возбуждающего тока [1, 4].

С учётом принятого вида $j(t)$ свёртка функций в выражении для плотности индуцированного тока – (30) будет равна

$$\frac{d j(t)}{d t} \cdot e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\tau} t} = j_m \cdot f_k(x, \varphi), \quad (31)$$

где

$$f_k(x, \varphi) = e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \cdot \sin \varphi - \frac{(\beta_k^2 + x^2) / (\omega \tau)}{1 + [(\beta_k^2 + x^2) / (\omega \tau) - \delta_0]^2} \times \\ \times \left[e^{-\delta_0 \varphi} \left\{ [(\beta_k^2 + x^2) / (\omega \tau) - \delta_0] \sin \varphi - \cos \varphi \right\} + e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \varphi} \right].$$

Выражение (30) в терминах исходных данных с учётом (31) принимает вид

$$I_\phi(R, t) = - \left(\frac{I_m \cdot w \cdot d}{R_2 - R_1} \right) \cdot \int_0^\infty \frac{F_1(\beta_k, x)}{F_2(\beta_k, x, h)} \times \\ \times f(x) \frac{(1 - J_0(x \cdot R/d))}{x} \cdot f_k(x, \varphi) \cdot dx, \quad (32)$$

где

$$f(x) = \frac{1}{x^2} \int_{x \cdot R_1/d}^{x \cdot R_2/d} y \cdot J_1(y) \cdot dy;$$

$$F_1(\beta_k, x) = 1 - \left(\cos(\beta_k) - \beta_k/x \cdot \sin(\beta_k) \right);$$

$$F_2(\beta_k, (\lambda d), h) = \cos(\beta_k) \left[\operatorname{sh}(x \cdot h/d) - (\beta_k/x)^2 \operatorname{ch}(x \cdot h/d) + \frac{e^{(x \cdot h/d)}}{x} \right] - \sin(\beta_k) \cdot \left(\frac{\beta_k}{x} \right) \left[e^{(x \cdot h/d)} + \frac{2 \operatorname{ch}(x \cdot h/d)}{x} \right].$$

Дисперсионное уравнение (27) в терминах переменной x принимает вид

$$\operatorname{tg}(\beta_k) = \frac{2}{\left(\frac{\beta_k - x}{x} \right) + \left(\frac{\beta_k + x}{\beta_k} \right) \cdot e^{-2 \left(\frac{x \cdot h}{d} \right)}}. \quad (33)$$

Аналогичным образом, из выражения (24) найдём радиальное распределение индуцированного тока

$$J_\phi(r, t) = - \left(\frac{I_m \cdot w}{R_2 - R_1} \right) \cdot \int_0^\infty \frac{F_1(\beta_k, x)}{F_2(\beta_k, x, h)} f(x) \times \\ \times J_1 \left(x \cdot \frac{r}{d} \right) \cdot f_k(x, \varphi) \cdot dx. \quad (34)$$

Выражения (32) и (34) представляют собой аналитические решения поставленной электродинамической задачи о возбуждении индуцированного тока в одном диске. Выражение (32) следует удвоить. Это даст полную величину тока во вторичной обмотке из двух дисков рассматриваемого согласующего устройства.

ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Полученные результаты проиллюстрируем численными оценками для ситуаций, реальных в практике МИОМ [1, 4].

Положим, что

а) для первичной обмотки $w = 20$, $h \approx 0.0025$ м, $R_1 = 0.015$ м, $R_2 = 0.075$ м,

б) для вторичной обмотки металл дисков – алюминий, $\gamma \approx 3.75 \cdot 10^7$ 1/Ом·м, сталь электротехническая, $\gamma \approx 0.2 \cdot 10^7$ 1/Ом·м, внешний радиус дисков – $R = R_2$.

в) рабочая частота – $f = 2$ кГц, относительный декремент затухания – $\delta = 0.25$.

Вначале оценка корней дисперсионного уравнения (33).

Графическая иллюстрация образа Фурье-Бесселевого преобразования для принятого радиального распределения тока в первичной обмотке дана на рис. 2.

Из графика на рис. 2 следует, что $f(x)/f_{\max} \ll 1$ уже для $x > 0.3-0.35$. Это означает, что при проведении вычислений можно считать $x \ll 1$. Корни дисперсионного уравнения определяются соответствующими зависимостями для β_k .

Результаты расчётов индуцированных токов приведены на графиках рис. 3-5.

ВЫВОДЫ

1. В ходе проведенных вычислений была рассчитана основная электродинамическая характеристика согласующего устройства "дискового" типа – коэффициента трансформации тока. Его Максимальная величина составляет $\sim 12 \div 13$.

2. Временные и амплитудные характеристики индуцированного тока определяются электропроводностью и толщиной металла вторичной обмотки (рис. 3 – рис. 5):

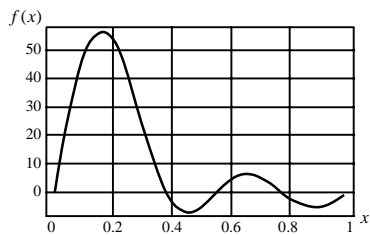


Рис. 2. Образ Фурье-Бесселя для принятого радиального распределения тока в первичной обмотке

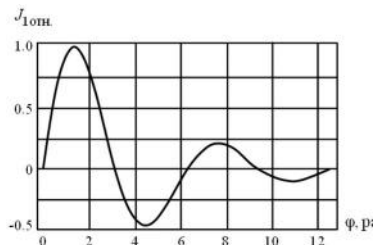


Рис. 3. Ток первичной обмотки в отношении к максимуму, $J_{1отн.} = J_1(\varphi)/J_{1m}$, $\varphi = \omega t - \text{фаза}$

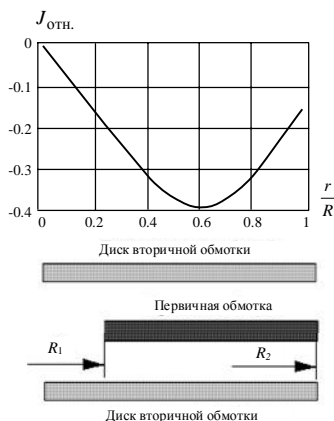


Рис. 6. Радиальное распределение плотности тока, индуцированного в металле диска, в отношении к максимуму плотности тока первичной обмотки

- при уменьшении проводимости и толщины дисков снижается величина коэффициента трансформации и по сравнению с током первичной обмотки искажается его временная зависимость (рис. 4);

- для дисков с толщиной, близкой к величине скин-слоя, искажения временных и амплитудных параметров исчезают (рис. 5).

3. Из графической зависимости на рис. 5 следует, что местом наиболее эффективного токосъема сигнала со вторичной обмотки является окружность по центру первичной обмотки согласующего устройства ($r/R \approx 0.6$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. Х.: Вища школа. 1977. – 189 с.
2. Батыгин Ю.В. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Е.А. Чаплыгин // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – №3. – С. 69-73.
3. Батыгин Ю.В. Вихревые токи в плоских листовых металлических заготовках / Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2006. – № 5. – С. 54-59.
4. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для про-

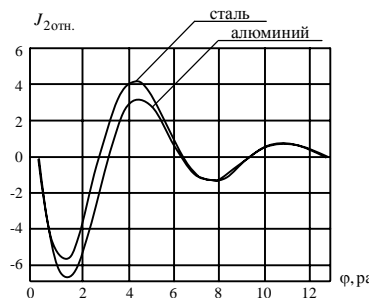


Рис. 4. Ток, индуцированный в одном диске, в отношении к максимуму тока первичной обмотки, $J_{2отн.} = J_2(\varphi)/J_{1m}$, $\varphi = \omega t - \text{фаза}$, толщина дисков одинакова – $d = 0.005$ м, (ток в двух дисках, соответственно, удваивается)

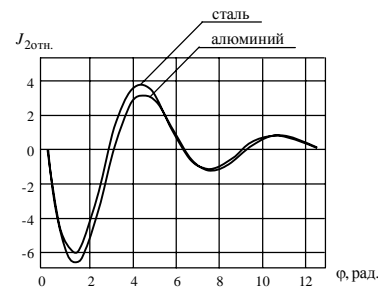


Рис. 5. Ток, индуцированный в одном диске, в отношении к максимуму тока первичной обмотки, $J_{2отн.} = J_2(\varphi)/J_{1m}$, $\varphi = \omega t - \text{фаза}$, толщина алюминиевого диска – $d = 0.005$ м, толщина стального диска равна эффективной глубине проникновения поля $d \approx 0.008$ м

грессивных технологий (научное издание). Том 1. Издание второе, перераб. и доп. Под общ. ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. / Ю.В. Батыгин., В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко. Харьков: Изд. "МОСТ-Торнадо", 2003. – 288 с.

5. Мэтьюз Дж. Математические методы физики / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер. Пер. с англ. канд. физ.-мат наук В.П. Крайнова. М: Атомиздат, 1972. – 399 с.

Bibliography (transliterated): 1. Belyj I.V. Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov / I.V. Belyj, S.M. Fertik, L.T. Himenko. H.: Vischa shkola. 1977. - 189 s. 2. Batygin Yu.V. Osobennosti tokov, inducirovannyh nizkочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij, E.A. Chaplygin // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2005. - №3. - S. 69-73. 3. Batygin Yu.V. Vihrevye toki v плоских листовых metallіcheskih zagotovkah / Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2006. - № 5. - S. 54-59. 4. Batygin Yu.V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij (nauchnoe izdanie). Tom 1. Izdanie vtoroje, pererab. i dop. Pod obsch. red. d.t.n., prof. Batygina Yu.V. / Yu.V. Batygin., V.I. Lavinskij, L.T. Himenko. Har'kov: Izd. "MOST-Tornado", 2003. - 288 s. 5. M'et'yuz Dzh. Matematicheskie metody fiziki / Dzh. M'et'yuz, R. Uoker. Per. s angl. kand. fiz.-mat nauk V.P. Krajnova. M: Atomizdat, 1972. - 399 s.

Поступила 20.04.2012

Батыгин Юрий Викторович, д.т.н., проф.
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, кафедра физики
61002, Харьков, ул. Петровского 25
тел. (057) 7003653
e-mail: batygin48@mail.ru

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., доц.
Трунова Ирина Сергеевна
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, кафедра автомобильной электроники
61002, Харьков, ул. Петровского 25
тел. (057) 7003852, e-mail: kalifus@yandex.ru

Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Trunova I.S.

A disk-type matching device.

Analysis of electrodynamic processes in a disk-type matching device is carried out in the article. Calculation of a current transformation ratio, the basic electrodynamic characteristics of the matching device, is conducted. Results obtained are illustrated with numerical evaluations of real-world situations in electromagnetic metal forming practice.

Key words – electrodynamic metal forming, transformation ratio, disk-type matching device, electrodynamic processes.

БРЖЕЗИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

(до 70-річчя з дня народження)

16 лютого 2012 р. виповнилося 70 років з дня народження відомого вченого в галузі техніки і електрофізики високих напруг, доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри техніки та електрофізики високих напруг Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Володимира Олександровича Бржезицького.

Після закінчення середньої школи у 1958 р. Володимир Олександрович вступив до електротехнічного факультету Київського політехнічного інституту, який успішно закінчив у 1963 р., отримавши кваліфікацію інженера-електромеханіка за спеціальністю «Електричні машини і апарати». За розподілом був направлений на Глухівський завод «Електропанель», де працював інженером-конструктором техвідділу.

Восени того ж року розпочав навчання в аспірантурі Інституту електродинаміки АН УРСР по спеціальності «Преобразование видов энергии». Перебуваючи в аспірантурі, пройшов стажування з фізики газового розряду в Інституті фізики при Ленінградському державному університеті. Після закінчення аспірантури та захисту кандидатської дисертації працював молодшим науковим співробітником відділу магнітної гідродинаміки та електромеханічних систем.

У 1973 р. зарахований на посаду старшого наукового співробітника Українського республіканського центру метрології і стандартизації Держстандарту СРСР, а вже у 1974 р. він був призначений начальником науково-дослідної лабораторії вимірювання високих напруг промислової частоти. З 1979 р. В. О. Бржезицький обіймає посаду начальника науково-дослідного сектора метрологічного забезпечення вимірювання високих напруг промислової частоти, а з 1980 року він виконує обов'язки начальника науково-дослідного відділу метрологічного забезпечення вимірів високих напруг.

З 1981 р. Бржезицький В. О. зарахований на посаду доцента кафедри ТВН КПІ (за конкурсом), де продовжує свою плідну працю.

У 1988 році кафедру техніки високих напруг перейменовано в кафедру техніки та електрофізики високих напруг, а В.О. Бржезицького призначено заступником завідувача кафедри ТЕВН.

У 1992 році він захистив докторську дисертацію, а з 1993 року обіймає посаду завідувача кафедри ТЕВН.

На кафедрі техніки та електрофізики високих напруг В. О. Бржезицьким виконувалась значна науково-організаційна робота, підготовлені та проведені всесоюзні семінари «Электромагнитное влияние грозовых разрядов на электрические цепи и устройства микроэлектроники» (Київ, 1985), «Электрофизические и прикладные вопросы высоковольтных измерений» (Запоріжжя, 1991).



В науковому доробку ювіляра понад 200 наукових доповідей та публікацій, 10 винаходів, відкриття нового фізичного явища «Вогневий стример». Виданий спільно зі співробітниками НТУ «Харківський політехнічний інститут» навчальний посібник «Техніка і електрофізика високих напруг» (найбільшим за обсягом з даної тематики). Ним підготовлено 6 кандидатів технічних наук.

Серед наукових напрацювань ювіляра слід відмітити такі:

- розроблений наближений метод кінетичного розрахунку електропровідності низькотемпературної плазми у магнітному полі та дослідження її загальних особливостей.

- розроблений комплекс методів для експериментального визначення

масштабних коефіцієнтів вимірювальних систем заземлених та незаземлених масштабних перетворювачів високих напруг різноманітних типів при їх робочих напругах, що характеризуються найбільш високою точністю.

- розкритий механізм впливу вищих гармонічних складових напруги на коефіцієнт трансформації високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги та розроблені заходи щодо мінімізації цього впливу.

- розроблений метод розрахунку та одержані аналітичні вирази індуктивності та взаємної індуктивності розсіювання для обмоток та шин, розташованих поблизу феромагнітної площини (з урахуванням її магнітної проникності), який є розвитком методу середніх геометричних відстаней.

- для проведення розрахунків потенціалів електричного поля запропонований наближений аналітичний вираз еліптичного інтегралу I-го роду з максимальною похибкою не більше $\pm 0,1\%$.

- розроблені нові аналітичні вирази для діагональних коефіцієнтів в інтегральних рівняннях I-го роду, що дозволяє значно підвищити точність їх рішень.

- для підвищення точності розв'язання інтегральних рівнянь II-го роду уведений в практику розрахунків високовольтної ізоляції безпосередній зв'язок «електричні заряди – складові напруженості електричного поля».

Наукова школа ювіляра приділяє значну увагу впровадженню наукових розробок в рамках діяльності Наукового парку «Київська політехніка». В. О. Бржезицький є членом спеціалізованих рад при НТУУ «Київський політехнічний інститут» та НТУ «Харківський політехнічний інститут».

Друзі, колеги, учні Володимира Олександровича щиро вітають його з ювілеєм, бажають йому доброго здоров'я та подальших успіхів у науковій та методичній роботі.

Редакційна колегія журналу «Електротехніка і Електромеханіка» приєднується до цих побажань, висловлюючи надію на подальшу довготривалу та плідну співпрацю з ювіляром.