



Електротехніка і Електроомеханіка

Электротехника и Электромеханика

Electrical engineering & Electromechanics

2008'1



Електротехніка і Електромеханіка
Электротехника и Электромеханика
Electrical engineering & Electromechanics

EIE

Науково-практичний журнал

2008'1

Держвидання

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

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор

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

Члени редколегії

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Панасенко М.В. д.т.н., професор, начальник Харківської філії Державного НДЦ залізничного транспорту України, Харків

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

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

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

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

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

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

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

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

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ

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

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

ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славені імена

Баранов М.И.	Лев Давидович Ландау – основоположник харьковской научной школы теоретической физики и квантовой физики конденсированного состояния материи	5
---------------------	---	----------

Електричні машини та апарати

Выровец С.В., Чепелюк А.А.	Анализ влияния ферромагнитных шунтов в рабочем зазоре на тяговые усилия в электромагните с однопозиционной магнитной защелкой	15
Голенков Г.М., Пархоменко Д.І., Макогон С.А., Бондар Р.П., Богасько М.В., Попков В.С.	Модельовання роботи коаксиально-лінійного синхронного вібратора з магнітним підвісом	18
Загирняк М.В., Бранспиз М.Ю.	Базовые уравнения задачи синтеза Ш-образного электромагнита	21
Лупиков В.С., Середа А.Г., Литвиненко В.В.	Быстродействующий автоматический выключатель постоянного тока высокого напряжения	25
Мишин В.И., Каплун В.В., Макаревич С.С.	Асинхронный электромеханический комплекс в автономной системе	30
Панченко В.І., Ципленков Д.В., Гребенюк А.М., Кириченко М.С.	Асинхронний двигун з явно вираженими зубцями та шестифазною обмоткою на статорі	36
Петрушин В.С., Якимец А.М., Каленик Б.В.	Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на энергетические показатели регулируемых асинхронных двигателей	38
Радимов И.Н., Рымша В.В., Гулый М.В., Процина З.П., Чан Тхи Тху Хьонг	Разработка вентильных двигателей с постоянными магнитами на базе штампа статора реактивной машины	41
Ставинский А.А.	Особенности назначения и использования специальных электрических машин	44
Сосков А.Г., Рак Н.О., Соскова И.А.	Анализ методов расчёта температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов в условиях их работы в коммутационных полупроводниковых аппаратах	49
Ткачук В.І., Каша Л.В.	Шляхи зменшення пульсацій електромагнітного моменту вентильного реактивного двигуна з буфером енергії	53
Чабан А.	Застосування штучних нейронних мереж для аналізу електромеханічних систем	57

Теоретична електротехніка

Баранов М.И.	Аналитическая оценка смещения периодической структуры волнового электронного пакета в металлическом проводнике с переменным электрическим током проводимости	60
--------------	--	----

Техніка сильних електричних та магнітних полів

Борцов А.В.	Генератор для физического моделирования импульсных электромагнитных полей	63
-------------	---	----

Список авторів		67
-----------------------	--	----

Abstracts		68
------------------	--	----

Перелік публікацій 2007 року		70
-------------------------------------	--	----

Вимоги до оформлення статей та інформаційних матеріалів у науково-практичному журналі "Електротехніка і Електромеханіка"		76
---	--	----

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

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

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

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

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

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

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

ЛЕВ ДАВИДОВИЧ ЛАНДАУ – ОСНОВОПОЛОЖНИК ХАРЬКОВСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИИ

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, E-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Приведено короткий науково – історичний нарис про творчий шлях і основні наукові досягнення в області теоретичної фізики видатного фізика – теоретика ХХ сторіччя Льва Давидовича Ландау.

Приведен краткий научно – исторический очерк о творческом пути и основных научных достижениях в области теоретической физики выдающегося физика – теоретика ХХ столетия Льва Давидовича Ландау.

100-летию со дня рождения выдающегося советского физика-теоретика, академика АН СССР, лауреата Нобелевской премии Льва Давидовича Ландау посвящается.

здесь у Л. Ландау были постоянные "хвосты".

1. ПЕРИОД УЧЕБЫ И СТАНОВЛЕНИЯ БУДУЩЕГО ФИЗИКА

Родился Лев Давидович Ландау 22 января 1908 года в г. Баку, являвшимся главным нефтедобывающим центром России. Его отцом был Давид Львович Ландау, инженер-нефтяник. Когда родился сын Льва, он занимал достаточно высокую должность главного инженера одного из бакинских нефтепромыслов. Мать Льва Ландау – Любовь Вениаминовна Гаркави-Ландау была врачом, закончила в 1904 году Петербургский женский медицинский институт [1]. Она выросла в бедной семье, всю жизнь много работала, была душевно сильным, решительным и деятельным человеком. Занималась она как практической лечебной медициной, так преподаванием и научной работой в области физиологии. Принадлежала мать Л.Д. Ландау к женщинам незаурядным. Ее разносторонность безусловно передалась и ее сыну, заложив в нем призвание быть не только ученым, но и педагогом. Лев был вторым ребенком в семье (до него родился его сестра Софья, ставшая впоследствии инженером-химиком). Свое образование он начал с гимназии, а в 13 лет сумел уже закончить среднюю школу. Способности к точным наукам, особенно к математике, проявились у него рано. Весной 1961 года наш герой уже в ранге всемирно знаменитого ученого в беседе со студентами Московского физико-технического института сказал [1]: "...Вундеркиндом я не был. Участь в школе, по сочинениям отметок выше троек не получал. Интересовался математикой. Все физики-теоретики в науку приходят от математики. И я не стал исключением. В двенадцать лет умел дифференцировать, а в тринадцать – интегрировать". Из-за малого возраста и щуплой комплекции после школы ему пришлось вместе со своей сестрой год проучиться в Бакинском экономическом техникуме. Зато осенью 1922 года в 14 лет он стал студентом Бакинского университета, причем сразу двух его факультетов: физико-математического и химического. Здесь он проучился только два года и в 1924 году Л. Ландау поступает на физическое отделение известного в среде российской высшей школы своим высоким образовательным статусом Ленинградского университета. Теоретические учебные дисциплины ему давались легко, а вот успешно заниматься вузовскими экспериментальными лабораторными работами он органически не мог. По физической лаборатории



Лев Давидович Ландау (1908г. – 1968г.)

Явные черты "чистого теоретика" у него появились уже на третьем курсе обучения. Поэтому на учебных физических семинарах он чувствовал себя очень свободно, легко вступал в дискуссии и научную полемику даже с такими известными университетскими преподавателями физики как Дмитрием Сергеевичем Рождественским (крупнейшим российским оптиком и специалистом в области спектроскопии тех времен) и Владимиром Александровичем Фоком (будущим советским академиком в области теоретической физики).

В 1926 году, еще будучи студентом университета, Л. Ландау стал сверхштатным аспирантом Ленинградского физико-технического института (тогда такое совмещение не запрещалось) и опубликовал свою первую научную работу "К теории спектров двухатомных молекул", где им был применен матричный метод расчетов [1, 2]. Эта работа 18-летнего Л. Ландау свидетельствовала уже о его весьма высоком физико-математическом уровне и показала его научную зрелость. Следующая статья молодого Л. Ландау "Проблема затухания в волновой механике", опубликованная в 1927 году, относилась к задачам торможения в квантовой механике, изучающей явления микромира. В ней он впервые ввел описание состояния квантовой системы с помощью матрицы плотности [2]. Тогда волновая механика только создавалась и оформлялась как отдельная отрасль физики. В этот период за грани-

цей была опубликована знаменитая серия статей выдающегося австрийского физика-теоретика Эрвина Шрёдингера на общую тему "Квантование как задача на собственные значения", заложившая основы волновой механики [3, 4]. Подчеркнем здесь то, что эти первые статьи Л. Ландау не потеряли своего значения и для современной физики. Ими открывается посмертный двухтомник научных трудов Л.Д. Ландау, в который включались только те работы, которые сохранили свою научную ценность для физики [1, 5, 6].

Во время учебы в Ленинградском университете Л. Ландау тесно подружился с будущими известными физиками-теоретиками: Георгием Гамовым (студенческая кличка – Джонни), прославившимся в США, и Дмитрием Иваненко (студенческая кличка – Димус), входившем в бывший СССР в славную академическую когорту советских ученых. Себя они называли "джаз-бандой", хотя по свидетельству их сокурсников им лучше подходило прозвище "физических мушкетеров". Основным жизненным смыслом, содержанием и целью этой тесной студенческой команды были занятия физикой и борьба за физику. Все они были молоды и были максималистами. Они верили в себя и в свои силы. То были бурные годы в физике – шло становление квантовой физики и такого ее раздела как волновая механика. Они на ходу "хватали" и усваивали новые физические идеи этой науки микромира. Тогда Л. Ландау и его друзья поставили перед собою крайне высокую цель: вывести отечественную физику на мировой уровень естественных знаний. В ту пору защита университетского диплома считалась значительным событием: из-за большого отсева студентов учебу в этом знаменитом заведении успешно заканчивали немногие. В 1927 году в возрасте 19-ти лет Л. Ландау с успехом защитил дипломную работу, базировавшуюся на его первой научной статье, и покинул физический факультет Ленинградского университета.

В 1929 году Л. Ландау в силу своих исключительных физико-математических способностей был направлен советским правительством на полтора года в научную командировку за границу. Тогда весьма широко практиковалась научная стажировка способных молодых физиков в ведущих научных центрах Европы. В 1959 году Л. Ландау о тех годах вспоминал [1]: "...Это путешествие имело для меня громадное значение. Я перевидел всех великих физиков. Не виделся только и теперь уже не увижусь с Энрико Ферми. Своим учителем считаю датского физика Нильса Бора. Именно он научил меня понимать принцип неопределенности квантовой механики". Большую часть своей командировки Л. Ландау провел в г. Копенгагене (Дания) в институте теоретической физики у Н. Бора, вокруг которого собирались начинающие и уже состоявшиеся физики-теоретики со всех континентов земного шара. Там в беседах, дискуссиях и в обсуждениях физических проблем в атмосфере подлинной духовности шла напряженная коллективная научная работа. Пример Н. Бора он безусловно использовал в недалеком будущем при создании в г. Харькове крупной советской школы теоретической физики. Работая в этот граничный период в г. Цюрихе (Швейцария) у знаменитого физика-теоретика Вольфганга Паули, Л. Ландау задумал и выполнил важную работу, связанную с квантовомеханическим описанием поведения "электронного газа" в металлах. Результатом этой работы стала его известная статья "Диамagnetизм металлов" [1, 2, 5]. Этой работой он в 1930 году теоретически предсказал

возникновение совершенно особых магнитных свойств у "электронного газа" в металле, которые определяют появление в этом сильно нетривиальном "газе" состояния, называемого диамagnetизмом. По современному определению диамagnetизм – это "магнитное состояние вещества, при котором его намагнитченность направлена навстречу вызывающему это состояние внешнему магнитному полю" [7]. Это явление вошло в науку под именем "диамagnetизма Ландау" [8]. Данная работа 22-летнего Л. Ландау стала важным научным "кирпичом" в здании современной физики.

2. ХАРЬКОВСКИЙ ПЕРИОД НАУЧНОЙ РАБОТЫ

В 1931 году Л. Ландау из заграничной командировки возвратился в г. Ленинград в Физико-технический институт, возглавляемый известным советским физиком, академиком АН СССР Абрамом Федоровичем Иоффе. Ведущей научной тематикой самого А.Ф. Иоффе была физика твердого тела. Он изучал электрические и механические свойства кристаллов, физику и технику полупроводников. Здесь наряду с научной работой Л. Ландау в ранге молодого профессора занимался и педагогической работой. Он по-прежнему числился в "молодых" и ему приходилось в ожесточенных спорах с коллегами отстаивать свою методику изложения студентам Ленинградского университета курса теоретической физики. В этот сложный для Л. Ландау ленинградский временной отрезок, пестрящий сложными людскими взаимоотношениями между ним и окружающими его физиками, двухсторонними язвительными выпадами и оценками, он пришел к трудному для себя выводу о необходимости смены окружающей обстановки. В 1932 году Л.Д. Ландау переезжает в г. Харьков для научной работы в Украинском физико-техническом институте (УФТИ). УФТИ (ныне он называется Национальный научный центр "ХФТИ"), как известно, был организован в октябре 1928 году и его первым директором был академик АН УССР Иван Васильевич Обреимов [9]. Тогда основной научной тематикой харьковского физико-технического института была физика твердого тела и низких температур [2]. Этот дальновидный руководитель УФТИ твердо считал, что для плодотворной работы его института, имеющего по преимуществу экспериментальную направленность своих физико-технических работ, необходимы молодые физики-теоретики, функционально и структурно объединенные в один теоретический отдел, возглавляемый крупным физиком [1, 9]. Так Л. Ландау с 1932 года на целых пять лет стал заведующим теоретическим отделом УФТИ. С этого времени он своей активной научной, организационной и педагогической деятельностью стал превращать УФТИ (да и сам г. Харьков) в ведущий отечественный и мировой центр теоретической физики. Добавим к этому то, что именно в УФТИ в 1932 году произошло знаменательное для всех физиков бывшего СССР событие огромного научного значения: здесь впервые в нашей стране и одними из первых в Европе (после английских физиков Кембриджского университета) советскими физиками был осуществлен известный физический эксперимент по расщеплению ядра лития искусственно ускоренными заряженными элементарными частицами. Ускорение этих частиц (протонов) было осуществлено с помощью созданных в УФТИ новых мощных высоковольтных установок мегавольтного диапазона. Такие высоковольтные ускорители в УФТИ были построены под научным руководством известных харьковских физи-

ков, академиков АН УССР Антона Карловича Вальтера и Кирилла Дмитриевича Синельникова [9, 10]. Подчеркнем здесь то, что под непосредственным научным руководством К.Д. Синельникова в УФТИ в 30-х годах были разработаны не уступающие зарубежным аналогам первые отечественные высоковакуумные диффузионные паромасляные насосы [9]. Кстати, этот тип мощных харьковских вакуумных насосов был успешно использован в 40-х годах прошлого столетия в рамках атомного проекта бывшего СССР в составе разделительных комплексов, предназначенных для выделения и накопления в вакууме "ядерной взрывчатки" – редкого и делящегося медленными нейтронами изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$ [9].

Низкотемпературные исследования. В УФТИ, когда там появился Л. Ландау, уже проводились интенсивные экспериментальные исследования в области физики низких температур. Научным руководителем этих работ был известный ученый Лев Васильевич Шубников [1, 9]. С ним у Л. Ландау сложились тесные плодотворные научно-производственные и дружеские отношения. Нашего физика-теоретика Дау очень заинтересовала низкотемпературная тематика УФТИ, связанная со сверхпроводимостью, сверхпроводящими сплавами, магнитными свойствами веществ вблизи абсолютного нуля. Заметим, что к этому времени Л.В. Шубников уже активно потрудился в мировом низкотемпературном центре, каким являлся Лейденский университет (Голландия). После возвращения из-за границы в УФТИ он создал и оснастил необходимой техникой единственную тогда в бывшем СССР криогенную лабораторию. Еще в г. Лейдене (кстати, в том городе, где в 1746 году голландским физиком Мушенбреком был изобретен и создан первый в мире цилиндрический накопитель (аккумулятор) электричества – знаменитая "лейденская банка" [10, 11]) Л.В. Шубников стал физиком-экспериментатором мирового класса. Свидетельством тому является открытое там им совместно с голландским физиком де Гаазе явление, которое потом назвали "эффектом Шубникова-де Газа" [8]. Суть этого эффекта заключается в неожиданном (осциллирующем) поведении электрического сопротивления металлов в сильном магнитном поле при низких температурах [1, 8]. Позже стало ясно, что это было первое открытие физиками-экспериментаторами чисто квантового эффекта в твердом теле, обусловленного квантованием энергетических уровней электронов металла в магнитном поле. Это была экспериментальная "картина микромира", нарисованная открытым героем нашего очерка теоретически в 1930 году "диамагнетизмом Ландау". Так удивительно интересно пересеклись, сами того не ведая, научные пути двух будущих сотрудников УФТИ, настоящих ученых и друзей Л.В. Шубникова и Л.Д. Ландау. Сегодня "эффект Шубникова-де Гааза" это универсальное и действенное средство для исследования процессов, протекающих в металлах, сплавах и некоторых видах полупроводников при криогенных температурах [8, 10]. Следующее важное открытие Л.В. Шубников сделал уже работая в УФТИ. Им было установлено, что магнитные свойства сверхпроводящих сплавов радикально отличаются от магнитных свойств сверхпроводящих чистых металлов. Тем самым он открыл сверхпроводники 2-го рода [8]. Долгие годы профессор Л.В. Шубников был заведующим кафедрой "Физики твердого тела" Харьковского университета имени В.Н. Каразина. Как жаль,

что в 1937 году этот известный харьковский ученый в разгул сталинских репрессий был арестован и в 1938 году погиб в застенках НКВД [9].

Явление сверхпроводимости занимало Л. Ландау как в харьковский период его работы, так и после. Но именно при работе в УФТИ возник у него глубокий научный интерес к поведению вещества при низких температурах. Из 17-ти опубликованных за время работы в УФТИ научных статей на разные физические темы четыре приходятся на низкотемпературную проблематику [1, 5, 6]. Основные научные публикации Л.Д. Ландау в период пребывания его в г. Харькове были посвящены теории фазовых переходов второго рода, исследованию кинетического уравнения при кулоновском взаимодействии элементарных частиц и теории промежуточного состояния в сверхпроводимости [2, 5, 6]. Эти работы Л.Д. Ландау и его учеников сделали в то время УФТИ и г. Харьков в целом ведущим научным центром теоретической физики в бывшем СССР. В 1934 году в УФТИ проходила международная конференция по теоретической физике, в работе которой принял участие великий датский физик-теоретик Н. Бор [1, 2, 12]. В ее организации и успешном проведении деятельное участие принял его ученик Л. Ландау. Он часто говорил [1, 2]: "...Бор – единственный мой учитель".

Начало научной школы теоретической физики. Именно в г. Харькове произошло рождение знаменитой научной школы Ландау. Именно здесь его совсем молодого Учителя (в возрасте 24 лет) благодарные Ученики и коллеги стали часто называть просто Дау. Это краткое имя нравилось и ему самому. Своим друзьям он в виде шутки объяснял, что если его фамилию прочитать по-французски, то получится "Landau – L'âne Dau", то есть "осел Дау" [1]. Л.Д. Ландау был прирожденным Учителем и Просветителем. Эта школа, как любой живой организм, эволюционировала, развивалась и менялась во времени. Она после своего харьковского рождения в 1932 году и переезда Л.Д. Ландау с УФТИ в 1937 году на работу в Институт физических проблем (ИФП) АН СССР достигла в г. Москве своего полного расцвета. Он был крайне озабочен созданием системы обучения и подготовки отечественных физиков, охватывающей все сверху донизу уровни образования. Его ученик, известный советский физик-теоретик А.С. Компанец в свое время сказал [1]: "...Л.Д. Ландау разработал строго продуманную систему научного воспитания. Ни одно звено интеллектуального роста ученого, начиная со скамьи в средней школе и до кресла академика, не было оставлено Ландау без внимания". Отсюда в г. Харькове у Л. Ландау возникла задумка и острая необходимость в создании собственного курса теоретической физики, охватывающего все разделы физики, и курса общей физики. Написать такие курсы в одиночку Л. Ландау не мог. Он был прекрасным докладчиком по физическим вопросам, но ему было крайне трудно излагать научные работы в письменном виде, то есть в области эпистолярного творчества он был, мягко говоря, не силен [2]. Среди молодых одаренных физиков с широким охватом проблем и задач теоретической физики в те годы в г. Харькове оказался Евгений Михайлович Лифшиц, который обладал к тому же исключительной способностью к литературному изложению физической тематики. Дальнейшие события показали, что Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц прекрасно дополняли друг друга в ра-

боте над задуманным курсом теоретической физики. Его первым томом была "Статистическая физика" (1938 год), второй том "Механика" появился в 1940 году, третьим томом была "Теория поля" (1941 год), четвертый том "Гидродинамика" и пятый том "Теория упругости" были изданы в 1944 году, шестой том "Квантовая механика" вышел в 1948 году, а седьмой том "Электродинамика сплошных сред" – в 1956 году. Это были прижизненные для Л.Д. Ландау издания томов фактически его курса теоретической физики, за которые в 1962 году он и Е.М. Лифшиц получили Ленинскую премию. Здесь необходимо указать то, что без Е.М. Лифшица такой всемирно известный курс физики не появился бы на свет. Его большой заслугой стало то, что в создаваемый курс он как физик высокого класса внес много своих научных идей и затратил много самоотверженного труда, добиваясь ясности, краткости и точности изложения сложнейших физических проблем и задач [1]. Авторы предполагали в дальнейшем написать еще два тома: "Физическая кинетика" и "Квантовая электродинамика" (одним из рабочих вариантов названия этого тома была "Релятивистская квантовая теория" [2]). Тяжелая автомобильная авария в 1962 году с участием нашего героя и преждевременная смерть Л.Д. Ландау в 1968 году помешали данному творческому замыслу. Эти тома уже без участия Л.Д. Ландау были подготовлены и изданы его учениками: Е.М. Лифшицем и Львом Петровичем Питаевским соответственно в 1979 и 1980 годах ("Квантовая электродинамика" совместно с В.Б. Берестецким). Кроме того, в 1978 году ими же была издана вторая часть "Статистической физики". Поэтому сейчас весь этот уникальный курс теоретической физики, переведенный на девять основных языков населения земного шара, состоит из десяти томов. Этот курс приобрел всемирную известность и популярность. В настоящее время по нему учатся во всем мире, он стал настольными книгами научных сотрудников, работающих не только в самой теоретической физике, но и в смежных с ней областях научных физических знаний.

К этому времени пребывания Л. Ландау в г. Харькове относится и его педагогическая работа в Харьковском химико-технологическом институте (ХХТИ) на кафедре физики [12]. Как известно, ХХТИ был образован в 1930 году на базе Харьковского технологического института (ХТИ), основанного в 1885 году [13]. В том же 1930 году на основе ХТИ были созданы известные в нашем городе Харьковский механико-машиностроительный институт (ХММИ) и Харьковский электротехнический институт (ХЭТИ), просуществовавшие до 1950 года, когда снова все они вместе объединились в один Харьковский политехнический институт (ХПИ). Со временем корректировалось и название ставшего родным автору этого очерка крупнейшего и престижнейшего вуза страны ХПИ. Ныне наш ХПИ называется Национальный технический университет "ХПИ". С 1935 года Л.Д. Ландау стал заведовать до своего отъезда в г. Москву кафедрой "Общей физики" и преподавать физику в Харьковском университете имени В.Н. Каразина.

Теоретический семинар. Возвращаясь к тридцатым годам ушедшего века, отметим, что в период напряженной научной работы Л. Ландау в г. Харькове он вел в УФТИ два теоретических семинара: один для физиков-экспериментаторов, а другой для физиков-теоретиков. Впоследствии ему пришлось ограничить-

ся только подготовкой теоретиков. Он очень серьезно относился к семинару: готовился к нему, подбирал и продумывал темы докладов совершенно из разных областей физики. С этого, видимо, и стал складываться его физический универсализм. Докладывание на семинаре вменялось в святой долг всех его учеников и физиков УФТИ. При этом единственным, кто не докладывал на семинаре, был сам Л. Ландау. Он выступал здесь в роли Учителя, который слушал, поправлял и направлял своих учеников. Здесь была его школа, где он учил своих Учеников физическому восприятию, правильному подходу и физическому мышлению. Семинар для него был всегда напряженной работой, сам Л. Ландау был наиболее активным его участником. Проводя эти семинары, он сам много получал от них: таким путем он узнавал новости в физике "на слух", не читая монографий и журнальных статей. На мой взгляд, это своеобразное пополнение своего научного "багажа" жидилось, наверное, на экономии Л. Ландау своего времени и его нежелании личной работы с научной литературой. На деле получалось что-то погуще на научно обоснованный жизненный компромисс: я Вас "зеленые" учу физике, а Вы мне приносите мировые "физические новости". Поэтому, если говорить без идеализации о личности Л.Д. Ландау то, наверное, многое в его научно-педагогической деятельности реально основывалось, как и реально в жизни, на взаимной выгоде Учителя и Учеников. Обе стороны выигрывали и научно обогащались. Посещавшие эти семинары иностранные физики были в удивлении и ошеломлении: нигде в мире семинаров одновременно по всей теоретической физике не было. Семинар традиционно начинался с прамбулы Л. Ландау [1]: "...Автор обычно бывает прав". Этой фразой Дау задавал изначальную доброжелательность к докладчику. Автору доклада необходимо было отчетливо понимать работу, то есть понимать то, что рассказываешь. Ему надо было надлежащим образом "подать" работу и донести до слушателя ее основное содержание, не слишком затрудняясь при ответах на постоянно перебивавшие его доклад реплики и вопросы. Не всем докладчикам удавалось рассказать и доказать ценность и новизну даже своей собственной научной работы. В этом случае его просто прогоняли от доски без всякой жалости. Эта жесткая процедура по отношению к Ученикам отражала лишь очень серьезное и весьма требовательное личное отношение их Учителя Л.Д. Ландау к физике.

Теоретический минимум. Во время работы в УФТИ у Л. Ландау в рамках подготовки классных молодых физиков возникла идея разработки и создания теоретического минимума по физике. Он им был подготовлен и назван "*Программа теоретического минимума для старших научных сотрудников УФТИ*". Данная программа, прежде всего, отличалась своей широтой, универсальностью и уникальностью. При сдаче этого специального теоретического минимума его ученики окунались во всю теоретическую физику, как в нечто единое и целое. Л.Д. Ландау воспитывал и формировал физиков-теоретиков широкого профиля, способных заниматься различными вопросами и без особых затруднений умеющих переходить из одной области физики в другую [1]. Независимо от будущей физической специализации каждый из его учеников должен был овладеть установленным Л.Д. Ландау теоретическим минимумом физических знаний и умением пользоваться этими знаниями. В свое время его верный ученик и

близкий друг Е.М. Лифшиц об этом подходе своего Учителя написал [1]: "...Разумеется, он не требовал ни от кого быть универсалом в той же степени, в которой он был сам. Но здесь проявлялось его убеждение в целостности теоретической физики как единой науки с едиными методами". Выучить весь теоретический минимум было очень трудно. Он принципиально отличался от соответствующего кандидатского минимума. Если в последнем случае сдавался просто спецпредмет, то в первом – вся теоретическая физика плюс математика в том виде, которая потребна для физика-теоретика. Первыми были два экзамена по спецматематике, а затем семь экзаменов по физике: механике, теории поля, квантовой механике, статистической физике, электродинамике сплошных сред, макроскопической электродинамике и релятивистской квантовой теории. Для изучения и подготовки этих дисциплин соискателю надо было пожертвовать несколькими годами своей жизни. Тот, кто сдавал теорминимум Л.Д. Ландау, ничего для себя непосредственно не приобретал, до поры до времени ничего в его официальном положении не менялось. Первым сдал этот теоретический минимум в 1933 году А.С. Компанеец. Всего за период с 1933 по 1961 годы этот минимум сдали Дау только 43 физика [1, 2]. Л.Д. Ландау вел строгий учет лиц, сдавших определенную часть или весь этот теоретический минимум. Непосредственно на его сдачу уходило от двух с "хвостиком" месяцев (как у лучшего ученика Дау, будущего академика АН СССР Исаака Яковлевича Померанчука) до нескольких лет у других. Весь трудоемкий процесс по сдаче и приему лично Л.Д. Ландау этого теоретического минимума строился на чистом энтузиазме. Для Дау эти экзамены приносили определенные практические результаты: таким путем происходило своего рода воспроизводство его учеников, из которых он находил и отбирал для последующих совместных работ наиболее талантливых и близких себе по духу физиков-теоретиков. В связи с этим в свое время Л.Д. Ландау говорил [1]: "...Никаких взаимных обязательств ни на кого сдача этих экзаменов не накладывает. Разве лишь на меня. Если я замечу способного юношу, то я считаю своим долгом помочь ему войти в науку". Да, наверное, для сдавших этот трудный теорминимум моральным выигрышем было самоуважение и самоутверждение. "...Этим ученикам Ландау щедро отдавал свое время и давал им большую свободу в выборе темы, и их работы публиковались под их именами" – писал очевидец этого уникального учебно-научного процесса выдающийся советский физик-экспериментатор XX века, академик АН СССР Петр Леонидович Капица [2, 14].

3. МОСКОВСКИЙ ПЕРИОД НАУЧНОЙ РАБОТЫ

В 1935 году в г. Москве П.Л. Капицей по постановлению советского правительства от 28 декабря 1934 года был фактически создан ИФП АН СССР [2, 14]. В этот новый институт физики, становление и насыщение необходимым научным оборудованием которого происходило в течение нескольких последующих лет, в начале 1937 года из УФТИ на работу приехал Л.Д. Ландау, а через год – его ближайший ученик и соавтор по учебному курсу теоретической физики Е.М. Лифшиц. Инициатором такого переезда Л.Д. Ландау был П.Л. Капица. Здесь Л.Д. Ландау вначале организовал и возглавил отдел теоретической физики. Затем организовал по четвергам еженедель-

ные общемосковские семинары по теоретической физике. В ИФП АН СССР Л.Д. Ландау окончательно нашел свой дом. Сюда из г. Харькова в 1937 году переехала его будущая жена Кора Дробанцева, инженер-технолог Харьковской кондитерской фабрики. Красота харьковчанки покорила его сердце и он влюбился в нее, что называется "по уши". В 1946 году у них родился сын Игорь, который стал в будущем физиком-экспериментатором. В 1937 году Л.Д. Ландау опубликовал свою фундаментальную теоретическую работу "К теории фазовых переходов", послужившую важным звеном в «цепи» задач квантовой физики конденсированного состояния [1, 2]. В ней он пишет [1, 6]: "...В точке фазового перехода I-рода находятся в равновесии тела в двух различных состояниях, а в точке фазового перехода II-рода состояния обеих фаз совпадают. Фазовые переходы II-рода всегда связаны с появлением у тела какого-либо нового качественного свойства при непрерывном изменении состояния. Это может быть какое-то свойство, связанное с магнитными свойствами вещества, это может быть появление так называемой сверхпроводимости – исчезновение электрического сопротивления". Заметим, что фазовым переходом II-рода называется превращение вещества, которое не связано с выделением или поглощением теплоты, как это происходит при фазовых переходах I-рода [15]. В том же 1937 году Л.Д. Ландау публикует важную для будущего объяснения парадоксов конденсированных состояний вещества (в частности, жидкого гелия) статью "К статистической теории ядер" [1, 6]. В ней он впервые в ядерной и квантовой физике формулирует идею об "квантовых жидкостях" ядер атомов и соответственно вещества в целом. Здесь лучше привести слова самого Л.Д. Ландау [1, 6]: "...Если учитывать взаимодействие частиц в ядре, то, конечно, нет никаких оснований рассматривать ядро как "твердое тело", то есть как "кристалл", а следует рассматривать его как "жидкую каплю" из протонов и нейтронов. В отличие от обычных жидкостей в этой жидкости существенную роль играют квантовые эффекты, так как квантовая неопределенность координат частиц внутри ядра значительно больше, чем их взаимные расстояния. Несмотря на то, что мы еще не имеем метода для теоретического исследования "квантовых жидкостей", можно все же вывести некоторые свойства ядер, применяя к ним статистические соображения".

На мой взгляд, для нас – электрофизиков (электротехников) и всех тех, кто поверхностно знаком с волновой механикой, последняя прямая речь мэтра теоретической физики в силу своей дальнейшей важности для понимания квантовых эффектов в конденсированных состояниях вещества и завуалированного обобщенного указания на критерии и область применимости законов классической и квантовой физики нуждается в определенном разъяснении. Выдающийся немецкий физик-теоретик Вернер Гейзенберг в 1925 году сформулировал основополагающий принцип квантовой механики, вошедший в квантовую физику как принцип неопределенности Гейзенберга [4, 8]. Математически этот принцип неопределенности квантовой физики для сопряженных переменных "импульс – координата" объекта микромира массой покоя m_0 , имеющего возможность двигаться, например, в декартовой системе координат только в направлении продольной оси OZ трехмерного про-

странства, может быть записан в следующем виде [8]:

$$\Delta p_{0z} \cdot \Delta z_0 \geq h/4\pi, \quad (1)$$

где $\Delta p_{0z} = m_0 \cdot \Delta v_{0z}$, Δz_0 – соответственно неопределенности в определении проекции импульса p (количества движения) объекта микромира на ось OZ и его пространственной координаты z ; Δv_{0z} – неопределенность скорости объекта микромира вдоль оси OZ ; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Наличие в (1) или ином математическом выражении знаменитого числа h указывает на то, что описываемые ими процессы и явления относятся к обширному "квантовому царству". Чуть раньше в 1924 году выдающийся французский физик-теоретик Луи де Бройль математически связал корпускулярные характеристики нерелятивистского электрона с длиной его волны λ_e и получил следующее знаменитое соотношение [8, 15]:

$$\lambda_e = h / m_e \cdot v_e, \quad (2)$$

где m_e , v_e – соответственно масса покоя и скорость электрона, равная групповой скорости электронных волн де Бройля.

Позже стало ясно, что формула (2) справедлива для всех представителей микромира, включая протоны, нейтроны, атомы и другие их микрообъекты. Формально соотношения (1) и (2) весьма математически похожи друг на друга при всем их физическом отличии. Тем не менее, они оба дают нам возможность численно оценить квантовые дуалистические характеристики объектов микромира. Пока на основании (1) и (2) качественно можно сказать одно: когда длина волны объекта микромира (или неопределенность его координат) намного меньше интересующих нас для рассматриваемого физического процесса геометрических размеров макрообъекта, то квантовые свойства макрообъекта по существу не проявляются и для описания этого физического процесса годится классическая физика. Когда же длина волны объекта микромира (или неопределенность его координат) становится сравнимой с указанными геометрическими размерами макрообъекта, то при описании рассматриваемого физического процесса в свои права вступает квантовая физика. При комнатной температуре в 293,16 К из-за сравнительно больших значений скоростей микрообъектов в веществе (или их неопределенности) квантовая природа физических процессов для макрообъекта обычно выявиться не может. При низких же температурах, когда тепловое движение атомов вещества (макрообъекта) достаточно мало (атомы "замирают"), начинает проявляться квантовая природа этих процессов. Например, для "квантовой жидкости", состоящей из атомов изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$ вблизи абсолютного нуля температуры, находящаяся в жидком конденсированном состоянии, согласно формуле (1) при $m_0 = 6,647 \cdot 10^{-27}$ кг [8, 15] и скажем $\Delta v_{0z} = 0,1$ м/с (при комнатной температуре неопределенность скорости атомов газообразного гелия может составлять порядка 10^3 м/с [16]) получаем, что неопределенность их продольной координаты Δz_0 оказывается равной не менее 79 нм. Что касается длины волны атома гелия, то при указанных выше условиях она на основании (2) составляет около 1 мкм. В результате приведенных приближенных оценок становится ясным, что квантовая неопределенность коор-

динат атомов гелия принимает значения, существенно превышающие взаимные расстояния между ними. Теперь мы видим, что при изучении физических процессов в жидком гелии при криогенных температурах вблизи абсолютного нуля необходимо исходить из положений квантовой физики.

П.Л. Капица, как директор ИФП АН СССР, с самого начала достаточно четко сформулировал основные принципы работы и жизнедеятельности нового академического института: заниматься только большой наукой, которая изучает основные явления Природы и ведет к их глубокому пониманию и познанию ее сущности [1]. *"В большой науке значительных успехов может добиться только глубоко творчески одаренный и творчески относящийся к своей работе человек. Хотя путь науки предопределен, но движение по этому пути обеспечивается только работами очень небольшого числа исключительно одаренных людей. Поэтому ядро института безусловно можно образовать из небольшого коллектива очень тщательно подобранных научных работников. Это ядро должно всецело отдаваться научной работе"* – говорил в то время П.Л. Капица [1, 2]. По моему мнению, это важное высказывание глубокого смыслового значения не потеряло своей актуальности и для сегодняшнего дня и для современных условий функционирования научных учреждений в любой стране мира. В рамках системного подхода к вопросам разумной организации и повышения эффективности проводимых научных исследований П.Л. Капица организовал проведение в своем институте научного физического семинара (знаменитого "капичника"). Л.Д. Ландау был активным участником этого физсеминара и неизменно в аудитории сидел в первом ряду. На первых же семинарах П.Л. Капица, научной сферой деятельности которого в ИФП АН СССР в те годы стала физика и техника низких температур [14], поведал своим слушателям об удивительных свойствах жидкого гелия-II, в частности, о чрезвычайно больших значениях его теплопроводности при протекании в тонких трубках (капиллярах), обнаруженных голландскими физиками из Лейденского университета, отцом Виллемом Гендриком Кеезомом и его дочерью [1, 2]. Показатели его теплопроводности значительно превышали (в сотни раз) соответствующие данные для лучших металлических проводников тепла – меди Cu и серебра Ag . Для ясности и лучшего понимания указанного выше напомним, что под теплопроводностью вещества понимается специфический процесс распространения (переноса) в нем тепла [8]. Причем, в твердом слабопроводящем электричество теле (например, диэлектрике) за счет относительно слабых колебаний его весьма жестко закрепленных атомов (молекул) и относительно малого числа вызываемых ими фононов (звуковых квантов энергии или квантов упругих колебаний [5]) идет медленный процесс взаимной передачи тепловой энергии от соседних атомов (молекул) друг другу в направлении от его локальных объемов с большей температурой в сторону его объемов с меньшей температурой. В металлах же тепло переносится как колебательным взаимосвязанным движением их ионов, жестко расположенных в узлах кристаллической решетки, так и свободными электронами, "снующими" со скоростью порядка 10^6 м/с между ионами узлов их решетки, движущихся со скоростью порядка 10^3 м/с, и обеспечивающими относительный рост числа фононов, распространяющихся в межатомном пространстве металла со скоростью звука

[15]. В жидкости же нет строго закрепленных для ее атомов (молекул) положений. Возможность течения ее слоев друг относительно друга приводит к такому виду теплопередачи в ней как конвективный перенос тепла. Напомним читателю и то, что согласно современным физическим данным при нормальном атмосферном давлении точка ожижения изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$ составляет 4,22 К [2, 15]. Этот жидкий гелий характеризуется нормальным состоянием и называется гелий-I [2, 15]. Гелий-I представляет собой трудно видимую прозрачную кипящую жидкость, удельный вес которой примерно в семь раз меньше воды [2]. Падающий на него узкий луч дневного света уже заставляет его кипеть. Поэтому для защиты его от окружающего тепла, сосуд Дьюара, в котором находится жидкий гелий-I, окружают двумя концентрично расположенными рядами вакуумных (дьюаровых) оболочек, между которыми, обычно, заливают жидкий воздух с температурой всего в 132 К [2]. При критической температуре 2,19 К в жидком гелии-I происходят фазовые изменения и он переходит в состояние, называемое гелий-II. Второе состояние жидкого гелия резко отличается от первого. Это обнаружил опять же в Лейденском университете на кафедре экспериментальной физики еще "отец" криотехники, выдающийся голландский физик, лауреат Нобелевской премии по физике Гейке Камерлинг-Оннес (этой премией он был награжден за великое открытие в 1911 году явления сверхпроводимости металлов), который в 1908 году (именно в год рождения Л. Ландау) первым в мире после больших трудов ожил гелий [2, 10]. Титанические 18-летние усилия Г. Камерлинг-Оннеса по доведению жидкого гелия-II до твердого состояния, закончившиеся с его смертью в 1926 году, не увенчались успехом. Вплоть до рекордно низкой на то время температуры в 0,83 К, достигнутой Г. Камерлинг-Оннесом, жидкий гелий-II оставался жидкостью.

Учитывая свои научные интересы, П.Л. Капица не мог пройти мимо таких интригующих и завораживающих ум ученого фактов. С этого времени (с начала 1937 года) он начинает свою серию изящных экспериментов по изучению свойств жидкого гелия. Эти эксперименты П.Л. Капицы завершились открытием им в 1937 году явления сверхтекучести гелия-II [2, 17]. Еще три года ушло на тщательные исследования поведения жидкого гелия в различных ситуациях [2, 18]. Им было показано, что вязкость жидкого гелия-II при его протекании через тонкие щели (шириной порядка полмикрона) была, по крайней мере, в тысячу раз меньше тех значений, которые определили до него канадские ученые из г. Торонто методом вращения металлического цилиндра в исследуемой жидкости [2, 19]. Кроме того, П.Л. Капице удалось установить, что вязкость жидкого гелия-II в пределах точности тогдашних измерений отличается от вязкости воды не менее чем в миллиард раз. Он писал [2, 17]: *"...Жидкий гелий-II обладает вязкостью, по крайней мере, в 10000 раз меньшей, чем водород в газообразном состоянии при самой низкой температуре, при которой его вязкость имеет наименьшее значение. Как известно, вязкость газообразного водорода считалась наименьшей измеренной вязкостью, известной для какой-либо текучей среды. Мне кажется, что этого предела уже достаточно, чтобы по сравнению с явлением сверхпроводимости считать, что жидкий гелий ниже лямбда-точки принимает особую моди-*

фикацию, которую ввиду ее исключительно малой вязкости можно было бы назвать сверхтекучей". Отметим, что вязкость это свойство жидкости (газа) сопротивляться движению (она измеряется вискозиметром [2]). Она обусловлена внутренним трением между слоями жидкости (газа) [15]. Именно вязкость и определяет в нашем случае текучесть жидкого гелия-II. Согласно современным данным динамический коэффициент вязкости η у гелия-II меньше величины 10^{-12} Па·с, а у гелия-I вблизи температуры 4,22 К этот коэффициент имеет значение порядка 10^{-6} Па·с [15]. Многочисленные попытки отечественных и зарубежных ученых по физическому объяснению удивительного (парадоксального) поведения жидкого гелия-II и теоретическому построению его возможных физико-математических моделей в течение долгого времени успеха не имели. Тем не менее, в 1978 году (после построения другими учеными общепризнанных в научном мире квантовых теорий сверхтекучести и сверхпроводимости) П.Л. Капице за "фундаментальные изобретения и открытия в области низких температур" была присуждена Нобелевская премия по физике. Что касается теории сверхтекучести, то о ней весьма детальный разговор у нас будет чуть дальше в разделе 4, а вот теория сверхпроводимости была разработана лишь в 1957 году Дж. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером [2, 20]. Как теперь известно, квантовомеханическая теория явления сверхпроводимости рассматривает его (это явление) как сверхтекучесть электронов в металле с присущим сверхтекучести отсутствием какого-либо трения. Свободные электроны или электроны проводимости движутся в сверхпроводнике беспрепятственно, то есть без "трения" об положительные ионы узлов кристаллической решетки металлического сверхпроводника (без изменения их энергии при столкновении с узлами решетки) [15, 20]. Основной квантовой особенностью сверхпроводника является то, что в нем возникает взаимное притяжение отрицательно заряженных электронов проводимости с образованием электронных пар. Причем, важнейшим свойством связанного в пары "коллектива" (облака) свободных электронов является невозможность обмена энергией между этими электронами и кристаллической решеткой металла малыми порциями, меньшими чем энергия связи пары электронов [15, 20, 21]. Поэтому в сверхпроводящем состоянии металла и не происходит рассеяния электронных волн де Бройля на тепловых колебаниях его кристаллической решетки или на включенных в его состав примесей [15]. А раз в металле нет потерь энергии дрейфующих свободных электронов под действием напряженности внешнего электрического поля, обусловленной приложенным к нему с его противоположных концов электрическим напряжением, то в нем нет и электрического сопротивления.

Итак, наступило лето 1941 года. ИФП АН СССР по решению Госкомитета обороны страны эвакуировали в г. Казань. Там Л.Д. Ландау до 1943 года отдавал все свои силы оборонной тематике: он выполнял расчеты многочисленных физических процессов, определяющих боеспособность вооружения и военной техники [1]. С 1943 года он возвращается в г. Москву в родной институт и продолжает работы оборонного профиля. В 1945 году после окончания Второй мировой войны Л.Д. Ландау в журнале "Доклады АН СССР" публикует сразу три научные статьи, посвященные военной проблематике и направленные на

описание процессов при детонации химических взрывчатых веществ [1, 6]. В 1946 году Л.Д. Ландау был сразу избран действительным членом АН СССР.

Еще летом 1934 года Л.Ландау, работая в харьковском УФТИ, относительно возможного использования атомной энергии имел свое мнение и считал [1]: *"...Существуют ядерные реакции, при которых освобождается энергия, но мы можем вызвать их только бомбардировкой заряженными частицами. Однако большинство заряженных частиц, проходя сквозь вещество, замедляется раньше, чем успевают понасть в ядро, поэтому приходится затрачивать гораздо больше энергии, чем получается при такой реакции. Не замедляясь, пролетают сквозь вещество нейтроны, но пока есть только один способ получать нейтроны – бомбардировкой заряженными частицами, то есть мы опять приходим к тем же трудностям. Но если когда-нибудь и кто-нибудь откроет реакцию, при которой нейтроны будут высвобождаться и вторичные нейтроны, и энергию, то тогда, считайте, дело будет в "шляпе"*". Сказал это Л. Ландау спустя два года после открытия в 1932 году английским физиком Джеймсом Чэдвигом нейтрона [4] и фактически за пять лет до знаменитого открытия группой немецких в Германии и немецко-австрийских в Дании и Швеции физиков (Отто Ганом, Фрицем Штрассманом, Лизой Мейтнер и Отто Фришем) цепной ядерной реакции деления на два "осколка" ядра изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$ медленными нейтронами [22].

После практического использования этой сопровождающейся выделением огромного количества энергии цепной ядерной реакции во взорванных атомных бомбах в июле (в США) и августе (в Японии) 1945 года [23] Л.Д. Ландау был привлечен к выполнению ряда спецзаданий для советского атомного проекта. Кстати, в комплексе работ СССР того времени по созданию ядерного оружия, научным руководителем которых был выдающийся советский физик-ядерщик, академик АН СССР Игорь Васильевич Курчатов, принимало участие большинство крупнейших физиков советской страны [1, 10]. Л.Д. Ландау в эти работы внес большой вклад при создании математических моделей указанных физических процессов микромира, сопровождающих такие ядерные реакции на различных стадиях их протекания. За эти работы он в январе 1954 года стал Героем Труда. Ему трижды присуждались Государственные премии (в 1946, 1949 и 1953 годах) и один раз Ленинская премия (1962 год). Был дважды награжден орденом Ленина и имел ряд других орденов. В стенах ИФП АН СССР к Л.Д. Ландау пришло и широкое международное признание его научного вклада в теоретическую физику: он был избран иностранным членом Лондонского Королевского общества, Национальной Академии наук США, Датской и Нидерландской Академий наук. Ему за научные заслуги были присуждены медали имени Макса Планка (Германия, 1961 год) и Фрица Лондона (США, 1961 год). И, наконец, в 1962 году Л.Д. Ландау была присуждена Нобелевская премия по физике. При вручении в г. Стокгольме (Швеция) этой премии в официальной формулировке Нобелевского комитета содержались такие слова: *"...За пионерские исследования в теории конденсированного состояния материи, в особенности жидкого гелия"*.

4. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕРХТЕКУЧЕСТИ ГЕЛИЯ – ЛУЧШАЯ И ГЛАВНАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА ЛАНДАУ

Л.Д. Ландау всегда интересовался различными физическими превращениями вещества или его фазовыми переходами. Изучив накопленные к 1941 году П.Л. Капицей экспериментальные материалы по жидкому гелию, Л.Д. Ландау приступил к теоретическому раскрытию феномена жидкого гелия-II. До него к жидкому гелию применяли законы классической физики, которые вступали в противоречие с результатами экспериментов. Л.Д. Ландау с учетом опытных данных пришел к тому выводу, что в жидком гелии-II происходит фазовый переход II-рода, которому он посвятил не одну свою научную статью. Он вначале предположил, что в этом конденсированном состоянии жидкий гелий становится "квантовой жидкостью". Напомним читателю, что в соответствии с современными положениями квантовой физики "квантовая жидкость" – это система сильно взаимодействующих друг с другом тождественных частиц, не локализованных четко в пространстве [24]. Он считал, что в жидком гелии-I по мере понижения температуры и уменьшения амплитуды и частоты тепловых колебаний его атомов (по мере уменьшения их скорости) дебройлевская длина волны по соотношению (2) возрастает и становится при температуре 2,19 К сравнимой с расстоянием между атомами гелия. Парадокс здесь уже заключался в том, квантовым объектом становится коллектив микрообъектов, как это ранее было известно в квантовой механике [25], а весь жидкий гелий во всем своем макрообъеме. Вот почему он не обязан затвердевать даже при абсолютном нуле температуры. Вот почему безуспешными оказались ранее упомянутые нами опыты Г. Камерлинг-Оннеса по получению кристаллического гелия. Но какова физическая природа этого уникального явления, происходящего только с жидким гелием? Как это явление можно описать теоретически? Эти вопросы требовали неординарного подхода. Вот тут-то и проявилась глубина и гибкость ума Дау: создавая теорию сверхтекучести гелия-II, он обращается к понятию квазичастиц ("почти – частиц"), живущих не индивидуально каждая сама по себе, а принадлежащих всему коллективу и макрообъему вещества. В качестве этих квазичастиц он выбрал *фононы* (звуковые кванты энергии), отвечающие за потенциальное движение материи, и *ротоны* (квантованные элементарные возбудители), отвечающие за ее вихревое движение [1, 6]. С помощью совокупности данных квазичастиц Л. Ландау описал поведение нормальной компоненты жидкого гелия-II. Нормальная компонента движется с трением и участвует в переносе энергии. Введенная им сверхтекучая компонента соответствовала жидкому гелию-II без квазичастиц. Сверхтекучая компонента движется без трения и не участвует в переносе энергии в форме теплоты. Так к 1945 году родилась двухжидкостная модель жидкого гелия [6, 15]. С нормальной компонентой связан запас внутренней энергии в жидком гелии. Сверхтекучая компонента жидкого гелия-II не имеет запаса внутренней энергии и не обладает вязкостью. По мере нагревания жидкого гелия-II в нем растет число *фононов* и увеличивается доля его нормальной компоненты. Пока температура не достигнет 2,19 К в гелии-II будет присутствовать сверхтекучая компонента. При температуре 2,19 К сверхтекучая компонента исчезает и гелий-II превращается в гелий-I и все особые свойства жидкого гелия-II исчезают [6, 15]. Выполнен-

ные в 1945 году докторантом ИФП АН СССР Элевте-ром Андроникашвили тонкие опыты по определению нормальной и сверхтекучей частей массы жидкого гелия-II полностью подтвердили разработанную Л.Д. Ландау фундаментальную теорию жидкого гелия [1, 2]. Заметим, что эта теория была создана применительно к основному изотопу гелия ${}^4\text{He}$ с целым спином, то есть для "бозе-жидкости", подчиняющейся квантовой статистике Бозе-Эйнштейна [15, 22]. В 1958 году Л.Д. Ландау создал квантовую теорию конденсированной "ферми-жидкости", образованной редким изотопом гелия ${}^3\text{He}$, открытым в 1939 году [1, 8]. Этот изотоп гелия сжижается при более низкой температуре 3,2 К, имеет полуцелый спин и подчиняется квантовой статистике Ферми-Дирака [15, 22]. Сверхтекучим он становится при очень низкой температуре 0,001 К. Теория и эксперимент подтвердили, что квантовые свойства этих двух жидкостей, образованных изотопами гелия ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{He}$, совершенно различны. В настоящее время во всем мире занимаются изучением "квантовых жидкостей", в том числе и жидких растворов, содержащих указанные выше изотопы гелия. Теоретическое описание квантовых эффектов в макроскопических системах и конденсированных состояниях вещества является одним из главных достижений теоретической физики за последние десятилетия XX и начало XXI веков [24].

5. ОСОБЕННОСТИ ЛИЧНОСТИ ЛАНДАУ И ЛАНДАУ ВНЕ ФИЗИКИ

Л.Д. Ландау как человек был наделен странной особенностью: отлично владевший устной речью, он становился прямо-таки мучительно беспомощным в случае, когда ему надо было что-то написать (толи статью в редакцию журнала, толи ответное письмо молодому физику, толи отзыв на научную работу и др.) [1, 2]. Сам Дау о себе говорил следующее [1]: *"...Вы, возможно, слышали, что я совершенно не способен к какой-либо писательской деятельности и все, написанное мною, всегда связано с соавторами"*. Необходимость изложения в письменной форме даже своих собственных идей затрудняла и сковывала его. Он с огромными трудностями и внутренним сопротивлением пытался излагать на бумаге свои мысли. Е.М. Лифшиц вспоминал [1]: *"...Ему было нелегко написать даже статью с изложением собственной (без соавторов) научной работы и все такие статьи в течение многих лет писались для него другими. Непреодолимое стремление к лаконичности и четкости выражений заставляло его так долго подбирать каждую фразу, что в результате труд написания чего угодно становился для него мучительным"*. Как правило, "этими другими" был сам Е.М. Лифшиц. При этом Л.Д. Ландау не уставал повторять всем и каждому про творческие способности Е.М. Лифшица [1]: *"...Женя блестяще пишет"*.

Одной из особенностей научной работы Л.Д. Ландау, практически начиная с харьковского периода, было то, что он сам, как правило, не читал научной литературы [2]. Это делали его ученики и ему рассказывали об основных использованных идеях, методах и полученных результатах в том или ином научном литературном источнике. Из воспоминаний А.С. Компанейца [1]: *"...За тридцать лет, что я знал Ландау, я видел его с книгой только раз. Все, что надо, он усваивал «с голоса» учеников, в частности, во время их докладов на семинаре"*. Художественную

литературу, особенно историческую, он с удовольствием читал. В редких случаях знакомства с работами по физике его обычно интересовали идеи и результаты. Все остальное ему было не нужно, все остальное (авторская аргументация, рассуждения, математические выкладки, способ доказательства) его даже раздражало. Весь промежуточный в опубликованной работе физико-математический путь он проделывал сам и по-своему [1].

У Л. Ландау поразительным образом сочеталась быстрота реакции с осведомленностью и большой глубиной понимания физических вопросов по всей теоретической физике. Его ученики отмечали, что подобного они ни у кого не встречали [1]. Упомянутый нами уже не раз его ученик А.С. Компанеец так суммировал это наблюдение об удивительном даре Дау [1]: *"...Ландау знал все, потому, что его все интересовало. По-видимому, не скоро будет среди физиков-теоретиков ученый с такой обширной эрудицией. Живые творческие знания, соединенные с абсолютной ясностью понимания предмета во всех оттенках"*.

П.Л. Капица в свое время написал [2]: *"...Л.Д. Ландау всегда проявлял живой интерес к эксперименту. Он охотно знакомился с результатами опытов, их обсчитывал и обсуждал их теоретическое значение. В научной работе для него органически необходимым было выявление связей теории с экспериментом. Экспериментаторы, в свою очередь, очень любили обсуждать с Ландау свои результаты"*.

Первое впечатление в отношении людей и в отношении физических теорий было для Л.Д. Ландау очень важным. Неудача при знакомстве с ним, сказанная глупость от волнения, некомпетентность в области своих научных занятий обычно лишали человека дальнейшей возможности общения с Л.Д. Ландау. Иногда даже близких своих учеников он "отлучал от физики". Недаром бытует мнение о его жесткости в вопросах физики и так сказать "научной жесткости". "Отлучал" он не только за несостоятельность в области теоретической физики, но и за недостойное Человека поведение в жизни.

Л.Д. Ландау, как отмечают его биографы и близкие люди, были присущи две редкие черты [1, 2]. Первая – пуризм или сверхцеломудренное отношение к науке, когда не допустимы никакие вольности и домыслы в научной работе, а все предельно строго, чисто и доказательно. Вторая – своеобразный демократизм не только по отношению к людям, но и по отношению к самой физике. По его мнению, любая научно-техническая задача достойна того, чтобы ею заниматься. При этом должно быть только одно условие – любая работа должна быть выполнена на высоком уровне. Он органически не терпел лодырей. Был твердо убежден в том, что работать надо много, особенно молодежи. Если у него складывалось негативное мнение о каком-то сотруднике, то его он обычно уже не менял. Особенно остроумным Л. Ландау был в своих отрицательных оценках результатов труда некоторых ученых и самих этих ученых. Эти оригинальные оценки быстро становились известными многим, в том числе и объекту оценки и критики. Это усложняло для Л. Ландау взаимоотношения особенно с теми людьми, которые занимали достаточно высокие служебные положения в академической среде [2]. Он любил всякие "зооанalogии". Однажды ему сказали, что у известного английского зоолога Брема написано, что "Дау" называют особую породу диких ло-

шадей. Л. Ландау очень понравилось такое "родство". Одна из любимых его фраз [1]: "...Если Вы не будете работать, то у Вас вырастет хвост". Это был человек, любящий юмор. В УФТИ на дверях его кабинета техперсоналом по согласованию с ним и по инициативе его друзей была сделана оригинальная надпись [1]: "Л. Ландау. Осторожно – кусается".

"Кусачий" характер Л. Ландау явно проявлялся на теоретических семинарах. В дискуссиях и научных спорах он был горяч и резок, но не груб. Был остроумен и ироничен, но не едок. Его ум был остро критичен. Все это вместе с учетом глубины его физических подходов к обсуждаемым вопросам делало дискуссии с его участием столь привлекательными, интересными и полезными для научного дела. Е.М. Лифшиц писал [1]: "...Л.Д. Ландау был глубоко демократичен в научной и обыденной жизни. Ему всегда были полностью чужды напыщенность и чиновничество. За советом и критикой к нему мог обратиться каждый, вне зависимости от своих научных заслуг и званий". Он очень не любил в науке пустого умствования, бессодержательности и безрезультативности, прикрытых лишь наукообразными сложностями. Как крупному ученому ему была свойственна научная бескомпромиссность и принципиальность. По характеру Л. Ландау был задиракой, резким (многим казалось – резким до грубости), саркастичным и экстравагантным человеком [1]. Но вместе с тем, как пишет П.Л. Капица, "...за этой резкостью в суждениях, по существу, скрывался очень добрый и отзывчивый человек, всегда готовый помочь незаслуженно обиженному" [2]. С годами, как отмечают очевидцы [1, 2], его характер и манеры поведения становились несколько мягче. Он стал менее язвительным и менее воинственным в своих оценках научного продукта других физиков. Больше всего в людях он ценил доброту. Не любил слово "ученый". В связи с этим Л. Ландау говорил [1]: "...Ученым бывает тудель. А мы – научные работники". Он был широко образованным человеком: хорошо знал английский и немецкий языки, свободно читал по-французски. Он интересовался многими видами искусства (за исключением музыки). Его суждения в области политики всегда носили "либо белый, либо черный цвет". Полутона как здесь, так и вообще в его жизни полностью отсутствовали.

С момента печально известной тяжелой автомобильной аварии на обледеневшей дороге по пути из г. Москвы в подмосковный г. Дубна, происшедшей 7 января 1962 года, Л.Д. Ландау только формально продолжал в течение своих последних шести лет жизни выполнять обязанности заведующего теоретическим отделом ИФП АН СССР [2]. После случившегося с ним, он полностью не восстановился и в большую науку так больше и не вернулся. Скончался Л.Д. Ландау 1 апреля 1968 года после тяжелой операции на кишечнике [2]. Похоронен он в г. Москве.

* * *

Л.Д. Ландау был одним из самых выдающихся ученых XX столетия. Он сыграл большую роль в настоящем возрождении и становлении в бывшем СССР теоретической физики. В нем высокий уровень научного творчества органично сочетался с высокой требовательностью, принципиальностью, моральной высотой и высоким нравственным потенциалом. Это был настоящий Учитель и Просветитель, многому научивший своих благодарных Учеников. Это был живой, интересный и добрый человек с весьма своеобразным характером. Он был незаурядной и непо-

вторимой Личностью – знаменитым Дау. Он был одним из немногих после Энрико Ферми во всем мире физиков-универсалов. Широта его научного творчества была беспрецедентна, она охватывала всю теоретическую физику. Все свои силы и всю свою творческую жизнь он отдал служению отечественной Науке.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ливанова А.М. Ландау.- М.: Знание, 1983. - 240 с.
- [2] Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика/ Статьи, выступления.- М.: Наука, 1981. - 495 с.
- [3] Schrödinger E. Quantisierung als Eigenwertproblem// Annalen der Physik.-1926.-№79.-S.489-527; 1926.-№79.-S.734-757; 1926.-№80.-S.437-491; 1926.-№81.-S. 109-140.
- [4] Баранов М.И. Эрвин Шредингер и новые пути развития физической науки микромира // Электротехника і електромеханіка.-2006.-№4. - С. 5-15.
- [5] Ландау Л.Д. Собрание трудов / Под ред. Е.М. Лифшица. - Том 1.- М.: Наука, 1969. - 512 с.
- [6] Ландау Л.Д. Собрание трудов / Под ред. Е.М. Лифшица. - Том 2.- М.: Наука, 1969. - 450 с.
- [7] Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. - М.: Русские словари, 2004.- 957 с.
- [8] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.-864с.
- [9] Коган В.С. "До" и "После".- Харьков: ННЦ "ХФТИ", 2004. - 97 с.
- [10] Кудрявцев П.С. Курс истории физики.- М.: Просвещение, 1974. - 312 с.
- [11] Баранов М.И. Ретроспектива исследований в области искусственного и атмосферного электричества и молниезащиты технических объектов // Электротехника і електромеханіка.-2006.-№5. - С. 5-13.
- [12] Кафедра общей і экспериментальной физики 1885-2005: очерк истории кафедры / Под общей ред. А.А. Мамалая.- Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – 52 с.
- [13] Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт": Фотоальбом / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, Г.В. ЛИСАЧУК, И.М. ШЕПТУН; Под общей ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСКОГО.- Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – 212 с.
- [14] Баранов М.И. Петр Леонидович Капица – основоположник техники сильных импульсных магнитных полей // Электротехника і електромеханіка.-2005.-№3. - С. 5-8.
- [15] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990.-624с.
- [16] Кухлинг Х. Справочник по физике/ Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина.- М.: Мир, 1982.-520с.
- [17] Капица П.Л. Вязкость жидкого гелия при температурах ниже лямбда-точки// Доклады АН СССР.-1938.-т.18.-С.21.
- [18] Капица П.Л. Исследование механизма теплопередачи в гелии-II // Журнал экспериментальной і теоретической физики.- 1941.-т.11.-№1. - С. 1.
- [19] Капица П.Л. Теплоперенос и сверхтекучесть гелия-II // Журнал экспериментальной і теоретической физики.- 1941.-т.11.-№6. - С. 58.
- [20] Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников.- М.: Наука, 1982. - 238 с.
- [21] Астафуров В.И., Бусев А.И. Строение вещества.- М.: Просвещение, 1977. - 160 с.
- [22] Баранов М.И. Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики і ядерной энергетике // Электротехника і електромеханіка.-2007.-№1. - С. 5-12.
- [23] Сегре Э. Энрико Ферми – физик / Пер. с англ. под ред. акад. Б.М. Потекорво.- М.: Мир, 1973. – 324 с.
- [24] Займан Дж. М. Современная квантовая теория / Пер. с англ. под ред. В.Л. Бонч-Бруевича.- М.: Мир, 1971. - 288 с.
- [25] Дирак П.А.М. Принципы квантовой механики/ Пер. с англ. под ред. акад. В.А. Фока.- М.: Наука, 1979.-480с.

Поступила 12.06.2007

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ШУНТОВ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ НА ТЯГОВЫЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТЕ С ОДНОПОЗИЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ ЗАЩЕЛКОЙ

Выровец С.В., Чепелюк А.А., к.т.н.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"

тел. (057) 707-69-76, E-mail: vsv@kpi.kharkov.ua, chep@kpi.kharkov.ua

Проаналізовано вплив ферромагнітного шунта в робочому проміжку на тягові зусилля в електромагніті з однопозиційною магнітною защілкою на базі висококоерцитивних постійних магнітів. Визначено раціональні розміри ферромагнітного шунта.

Проанализировано влияние ферромагнитного шунта в рабочем зазоре на тяговые усилия в электромагните с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов. Определены рациональные размеры ферромагнитного шунта.

Проведенные в [1] исследования приводного электромагнита постоянного тока с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов [2, 3] для вакуумных выключателей на средние напряжения подтвердили его работоспособность и высокие технические характеристики.

При проектировании таких электромагнитов необходимо стремиться к созданию в них достаточных тяговых усилий в режиме удержания якоря, соответствующих включенному состоянию выключателя, учитывая при этом требования по высокому их быстродействию (как при включении выключателя, так и при его отключении).

Одним из технических решений, направленных на уменьшение времени включения электромагнита, предложенного в [2, 3], является установка в рабочем зазоре электромагнита ферромагнитного шунта, наличие которого повышает тяговую силу на начальном ходе якоря электромагнита за счет увеличения магнитной проводимости рабочего воздушного зазора. Эскиз конструкции такого электромагнита приведен на рис. 1. Принцип действия предложенного электромагнита аналогичен электромагниту постоянного тока с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов и был описан в [1, 2].

Следует отметить, что применение ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах электромагнитов приводит к снижению тягового усилия в режиме удержания [4]. Применительно к исследуемой конструкции электромагнита это не является недостатком, так как предварительные расчеты показали достаточный запас по силе в режиме удержания электромагнита. Чрезмерно большой запас по силе может привести к снижению износостойкости электромагнита (избыток кинетической энергии подвижной части выключателя расходуется на удары деталей и др.), а также к увеличению времени отключения электромагнита (за счет увеличения времени спадания суммарного магнитного потока в рабочем зазоре при отключении, создаваемого постоянным магнитом и МДС отключающей обмотки).

Расчет магнитной системы с ферромагнитным шунтом производился методом конечных элементов с помощью программы femm [1].

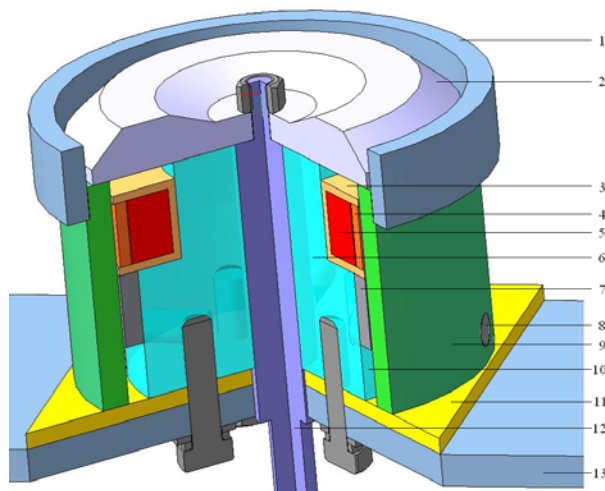


Рис. 1. Эскиз электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов с ферромагнитным шунтом в рабочем зазоре (1 – ферромагнитный шунт, 2 – якорь, 3 – каркас катушки, 4 – отключающая обмотка, 5 – включающая обмотка, 6 – сердечник, 7 – постоянные магниты, 8 – шпилька, 9 – корпус, 10 – воздушный зазор (шунт), 11 – немагнитный фланец, 12 – немагнитный шток, 13 – элемент выключателя для крепления электромагнита)

Расчетная модель (осесимметричная задача) магнитной системы исследуемого электромагнита при начальном ходе якоря приведена на рис. 2. В расчетной модели магнитной системы размеры деталей и участков магнитопровода составили (в мм): $d_{с.вн} = 20$, $d_{с.нар} = 106$ – внутренний и наружный диаметры сердечника; $d_{я.вн} = 10$, $d_{я.нар} = 137$ – внутренний и наружный диаметры дискообразного якоря; $\Delta_{узк} = 9$, $\Delta_{ут} = 19$ – высота якоря в узком и в утолщенном местах; $b_{ут} = 13$ – ширина утолщенного места в якоря; $d_{к.вн} = 117$, $d_{к.нар} = 139$ – внутренний и наружный диаметры корпуса; $h_c = h_{кп} = 89$ – высота сердечника и корпуса; $h_m = 38$, $\Delta_m = 5$ – высота и толщина постоянного магнита; $h_b = 22$, $\Delta_b = 5,5$ – высота и толщина воздушного шунта (зазора); $\delta_n = 0,25$ – величина нерабочих воздушных зазоров между постоянным магнитом и сердечником (и корпусом); $\delta_{от} = 0,1$ – вели-

чина остаточного воздушного зазора между якорем и сердечником (и корпусом); $h_k = 29$, $a_k = 20,5$ – высота и ширина пространства для установки катушки; $d_k = 80$ – внутренний диаметр намотки катушки; $h_{вкл} = 25$, $a_{вкл} = 12,7$ – высота и ширина намотки включающей обмотки; $h_{откл} = 25$, $a_{откл} = 3,3$ – высота и ширина намотки отключающей обмотки. Материал ферромагнитных деталей электромагнита – сталь 10. Материал постоянного магнита – композиция Nd-Fe-B с коэрцитивной силой 750 кА/м и остаточной магнитной индукцией 1,07 Тл. Величина рабочего зазора (ход якоря) в исследуемом электромагните – $\delta = 18$ мм. МДС включающей обмотки была определена в [1] и составила $F_{вкл, \min} = 14233$ А.

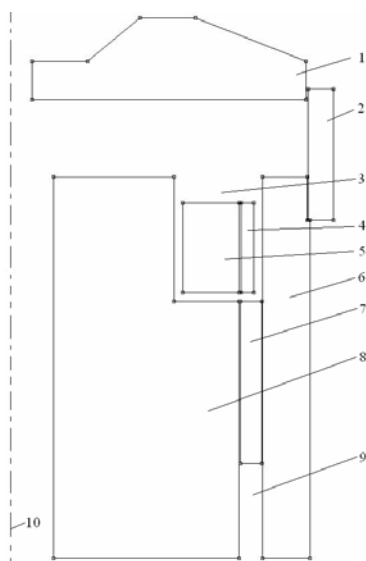


Рис. 2. Расчетная модель магнитной системы электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой с ферромагнитным шунтом в рабочем зазоре (1 – якорь, 2 – ферромагнитный шунт, 3 – пространство для установки катушки, 4 – отключающая обмотка, 5 – включающая обмотка, 6 – корпус, 7 – постоянные магниты, 8 – сердечник, 9 – воздушный зазор (шунт), 10 – ось симметрии магнитной системы)

Для оценки влияния размеров ферромагнитного шунта в рабочем зазоре на тяговые усилия, развиваемые в электромагните, его размеры, при расчетах магнитной системы, варьировались. Величина остаточного воздушного зазора между корпусом и шунтом принималась – $\delta_{\text{шн}} = 0,1$ мм, высота прилегающей к корпусу части шунта составила 10 мм.

Для установления зависимости развиваемого в электромагните начального статического тягового усилия от высоты ферромагнитного шунта проводились расчеты тяговой силы в начальном положении якоря при различной высоте шунта в момент включения электромагнита. Толщина шунта при этом предварительно принималась $\Delta_{\text{ш}} = 11$ мм. Под высотой ферромагнитного шунта $h_{\text{ш}}$ понимали высоту части шунта, выступающей над рабочей плоскостью электромагнита. Высота шунта в расчетах варьировалась в диапазоне 16-22 мм. По результатам расчетов на рис. 3 построена зависимость развиваемого в элек-

тромагните начального тягового усилия от высоты ферромагнитного шунта в рабочем зазоре.

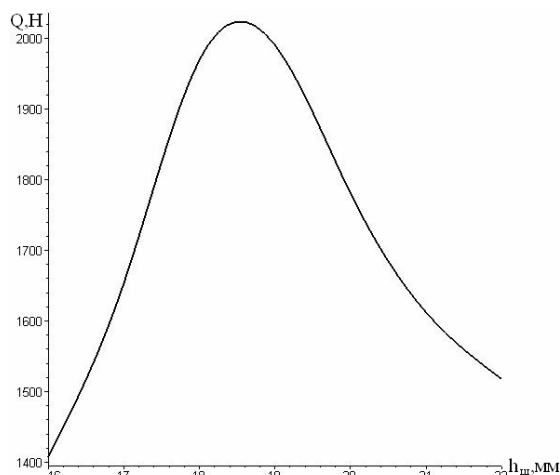


Рис. 3. Зависимость начального тягового усилия электромагнита от высоты ферромагнитного шунта

На основании анализа полученной зависимости можно сделать следующие выводы.

1. Зависимость тягового усилия электромагнита в начальном ходе якоря от высоты шунта в исследуемом диапазоне высоты шунта моноэкстремальная. Следовательно, для исследуемого конструктивного исполнения электромагнита, при заданном ходе якоря существует наиболее оптимальная высота ферромагнитного шунта, при которой обеспечивается максимум начального тягового усилия.

2. Наибольшее тяговое усилие в исследуемом электромагните составляет 2090 Н и оно развивается при высоте ферромагнитного шунта 18,5 мм, которая может быть выбрана для указанного электромагнита как наиболее приемлемая.

При найденной высоте ферромагнитного шунта, для установления зависимости развиваемого в электромагните начального тягового усилия от толщины ферромагнитного шунта, проводились расчеты тяговой силы в начальном положении якоря при различной ширине шунта, которая варьировалась в диапазоне 4-11 мм. По результатам расчетов получена зависимость развиваемого в электромагните начального тягового усилия от толщины ферромагнитного шунта в рабочем зазоре – рис. 4.

На основании анализа указанной зависимости можно сделать вывод о существовании для исследуемого конструктивного исполнения электромагнита, при заданном ходе якоря, наиболее оптимальной толщины ферромагнитного шунта, при которой обеспечивается максимум начального тягового усилия. В исследуемом электромагните эта толщина составляет 6 мм. Начальное тяговое усилие при этом – 2104 Н.

Для оценки влияния ферромагнитного шунта на тяговые усилия электромагнита на всем ходе якоря проводился расчет статической тяговой характеристики электромагнита с рациональными размерами ферромагнитных шунтов. Результаты расчета статической тяговой характеристики сведены в табл. 1.

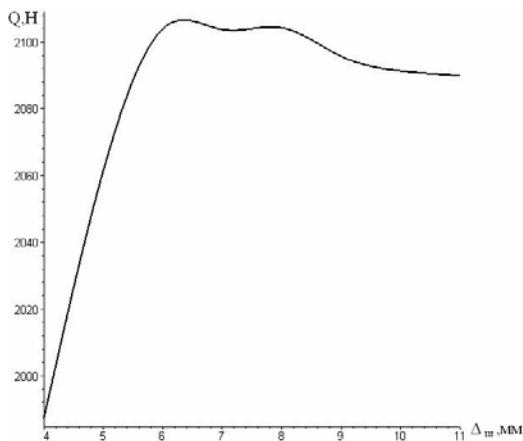


Рис. 4. Зависимость начального тягового усилия электромагнита от толщины ферромагнитного шунта

Таблица 1

Расчетная статическая тяговая характеристика электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой с ферромагнитным шунтом в рабочем зазоре

δ , мм	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Q , Н	15935	8323	6245	4768	3615	2964	2486	2183	2024	2104

Согласно расчетам сила удержания якоря в притянутом положении в электромагните с рациональными размерами ферромагнитного шунта – 8516 Н.

На рис. 5 проведено сопоставление расчетных статических тяговых характеристик базовой конструкции электромагнита (без ферромагнитного шунта) [1] и исследуемого электромагнита с ферромагнитным шунтом, построенной по данным из табл. 1, с противодействующей характеристикой выключателя [1].

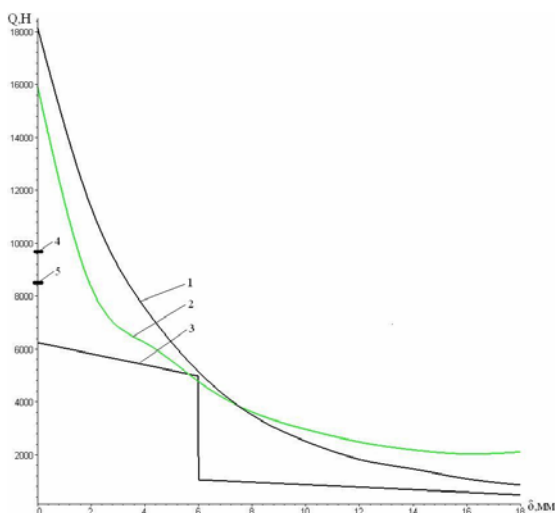


Рис. 5. Сопоставление статических тяговых характеристик электромагнитов с противодействующей характеристикой выключателя (1 – статическая тяговая характеристика базового электромагнита, 2 – статическая тяговая характеристика электромагнита с ферромагнитным шунтом, 3 – противодействующая характеристика выключателя, 4 – сила удержания якоря в базовом электромагните, 5 – сила

удержания якоря в электромагните с ферромагнитным шунтом)

Анализ зависимостей на рис. 5 позволяет сделать следующие выводы.

1. Установка ферромагнитного шунта в рабочем зазоре электромагнита приводит к существенному увеличению тяговых усилий на значительном ходе якоря (более 10 мм).

2. Начальное тяговое усилие в исследуемом электромагните с ферромагнитным шунтом в 2,45 раза превышает начальное тяговое усилие базовой конструкции электромагнита без ферромагнитного шунта.

3. Запас по тяговой силе в начальном положении якоря исследуемого электромагнита составляет 4,3. Существование такого запаса позволяет, за счет более быстрого разгона якоря, сократить время включения электромагнита.

4. Уменьшение тягового усилия в конечном положении якоря в электромагните с ферромагнитным шунтом по сравнению с базовым электромагнитом нельзя считать недостатком исследуемого электромагнита, поскольку снижение тяговой силы не превышает 12%, а запас по тяговой силе при притяннутом якоря в исследуемом электромагните составляет 1,36 раза, что гарантирует надежное удержания якоря в притяннутом положении.

5. Наличие на рисунке небольшого участка, где тяговая сила, развиваемая исследуемым электромагнитом, становится меньше противодействующей силы выключателя, не свидетельствует о не работоспособности электромагнита, поскольку в динамике, при движении якоря, он проходит этот участок по инерции за счет запасенной в подвижных частях кинетической энергии.

Таким образом, на основании проведенных исследований была подтверждена целесообразность использования в приводных электромагнитах постоянного тока с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов ферромагнитного шунта в рабочем зазоре. Определение рациональных размеров ферромагнитного шунта (его высоты и толщины) позволило существенно увеличить тяговые усилия на значительном ходе якоря исследуемого электромагнита.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Выводец С.В., Чеплюк А.А. Расчет магнитной системы с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов для вакуумных выключателей // Электротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – №6. – С. 15-19.
- [2] Патент України № 15210 Электромагнітний привод // авт. Клименко Б.В., Выводец С.В., Форкун Я.Б. Оpubл.15.06.2006 р., Бюл. №16.
- [3] Клименко Б.В., Гречко А.М., Выводец С.В. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехніка і електромеханіка. - Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 4. – С. 22-26.
- [4] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.

Поступила 29.11.06

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КОАКСІАЛЬНО-ЛІНІЙНОГО СИНХРОННОГО ВІБРАТОРА З МАГНІТНИМ ПІДВІСОМ

Голенков Г.М., к.т.н., Пархоменко Д.І., Макогон С.А., Бондар Р.П.

Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра "Електротехніки та електроприводу"
Україна, 03037, Київ-37, пр. Повітрофлотський, 31

Богаєнко М.В., Попков В.С.

Науково-впроваджувальне підприємство "Промелектрообладнання"

Україна, 03179, Київ, вул. Ірпінська, 63а/125

тел. (044) 459-52-42

Моделюється робота коаксально-лінійного синхронного вібратора з магнітним підвісом. Отримано електромеханічні параметри та характеристики вібратора для закону регулювання $U/f=const$. Розрахунок поточкозчеплення виконується на основі розв'язку задачі розподілу електромагнітного поля в активній зоні вібратора та магнітного підвісу.

Моделируется работа коаксально-линейного синхронного вибратора с магнитным подвесом. Получены электромеханические параметры и характеристики вибратора для закона регулирования $U/f=const$. Расчет поточкозчепления выполняется на основании решения задачи электромагнитного поля в активной зоне вибратора и магнитного подвеса.

ВСТУП

Відомі конструкції коаксально-лінійних електромагнітних вібраторів [1] та вібраторів із збудженням від постійних магнітів на основі рідкоземельних матеріалів [2]. Такі вібратори мають переваги над вібраторами з двигунами обертання, амплітуда коливань яких забезпечується дебалансними системами [4]; а також, надійністю роботи та високим ККД через відсутність механічних передач. Тому дані вібратори можуть отримувати широке застосування у будівельному виробництві [4], транспортних системах та автоматичних пристроях [3].

Застосування вібраторів у технологічних процесах, наприклад для занурення паль, шпунтів, установках для без траншейної прокладки підземних комунікацій, для ущільнення бетонних мас та інших, потребує системи керування, що забезпечує резонансні явища, які призводять до зниження затрат електричної енергії та підвищення ККД.

В ході технологічного процесу можуть змінюватись технологічні параметри системи "вібратор-середовище", що призведе до зміни власної частоти її коливань.

Так як резонансна частота f_0 пов'язана з жорсткістю пружного елемента k_n та масою коливальної частини m_c виразом [7]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_n}{m_c}} \quad (1)$$

та ці параметри конструктивно закладені у вібраторі і впливати на них в ході технологічного процесу ускладнено, то метою даної роботи є розробка конструкції вібратора, яка б дозволила оперативно змінювати власну частоту коливань вібратора та електромеханічні параметри.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ВІБРАТОРА З МАГНІТНИМ ПІДВІСОМ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Електричний вібратор з магнітним підвісом, що пропонується, приводом якого є коаксально-лінійний синхронний двигун з постійними магнітами (КЛСД) з магнітним підвісом (МП) [5], дозволяє уникнути вище згаданих недоліків. Його конструкція зображена на рис.1, де 1 – корпус, 2 – магнітопровід вібратора, 3 – обмотки вібратора, 4 – магнітопровід підвісу, 5 – обмотки підвісу, 6 – постійні магніти, 7 – концентратори, 8 – стрижень, 9 – підшипники ковзання, 10 – пружні елементи.

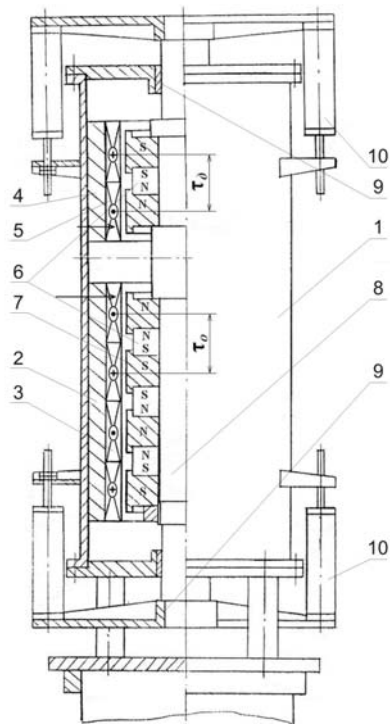


Рис. 1

Схема заміщення на рис. 2, де $R1$ -активний опір обмотки вібратора, $R2$ -активний опір обмотки підвісу, $L1$ та $L2$ – індуктивності (відповідно), ПЧ – перетворювач частоти, ПН – перетворювач напруги.

Робота КЛСД з МП відбувається наступним чином. При подачі змінного струму на обмотки вібратора через перетворювач частоти створюється магнітне поле, що пульсує, яке при взаємодії з полем постійних магнітів призводить до коливання якоря з амплітудою x . При подачі постійної напруги через перетворювач напруги на обмотку статора підвісу виникає магнітний потік, який при взаємодії з полюсами магнітів викликає силу, що діє на ярів підвісу і створює ефект магнітної пружини. Регулювання значення напруги на магнітному підвісі призведе до відповідної зміни значення його жорсткості.

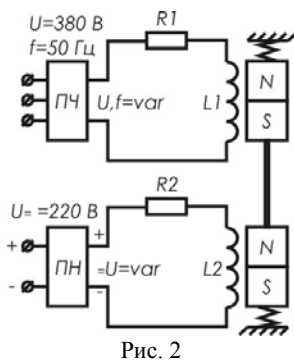
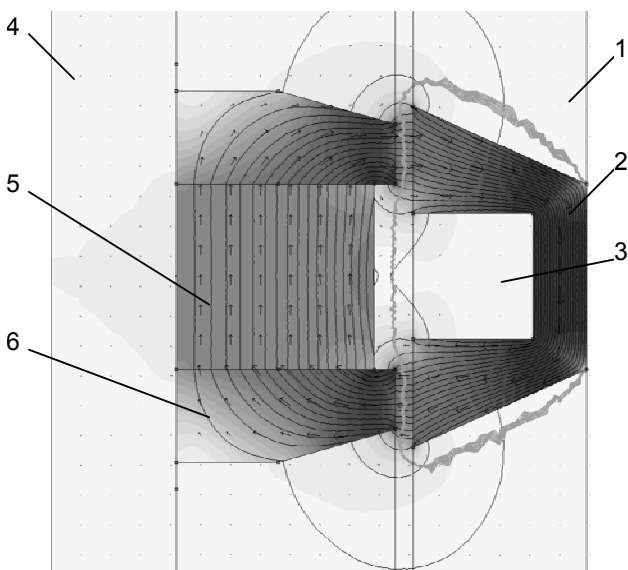


Рис. 2

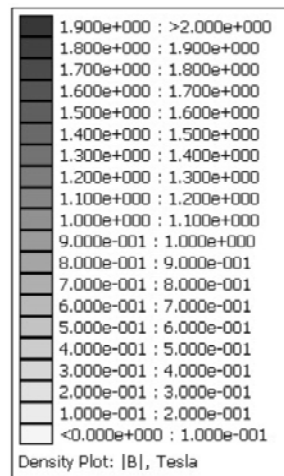
Моделювання магнітного підвісу проводилося методом кінцевих елементів за допомогою програми FEMM [8] (рис. 3), де 1 – корпус, 2 – магнітопровід статора, 3 – обмотка, 4 – стрижень, 5 – постійний магніт, 6 – концентратори. Розподіл магнітної індукції та розрахункових значень векторного потенціалу (ізо-ліній) в осьовому перерізі і тензора натягу Максвелла – величини nT (радіальна компонента) показаний на рис. 3, а. Стрілками показано напрямок магнітного потоку. Розподіл інтенсивності електромагнітного



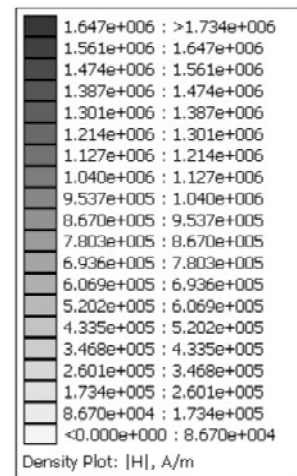
а

поля показаний рис. 3, б. Розраховані значення для кожного з графіків наведені в табл. 1 та табл. 2 відповідно.

Таблиця 1



Таблиця 2

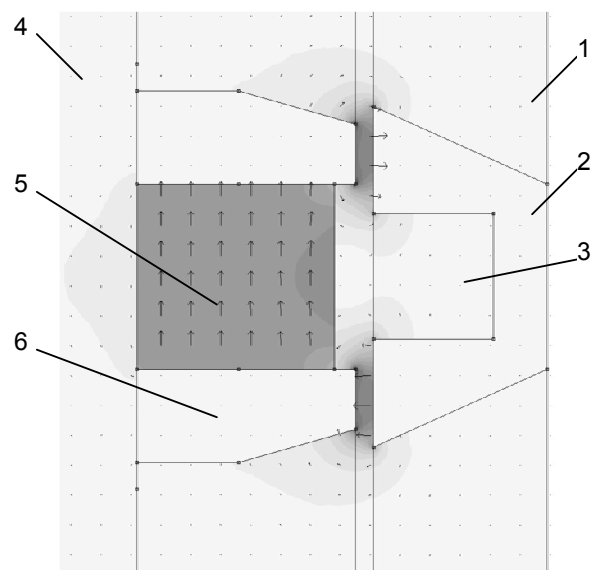


МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ВІБРАТОРА З МАГНІТНИМ ПІДВІСОМ

Електромеханічний процес у системі "вібратор-підвіс" при підключенні обмотки вібратора до змінної напруги для випадку одномасової механічної системи описується наступною системою диференціальних рівнянь записаних у формі Коші:

$$\begin{cases} L_{\text{віб}} \frac{di_{\text{віб}}}{dt} = U_{\text{віб}} - Vi_{\text{віб}} - \frac{dL_{\text{віб}}}{dx} i_{\text{віб}} - R_{\text{віб}} i_{\text{віб}} - V \frac{d\psi_{0\text{віб}}}{dx}; \\ L_{\text{підв}} \frac{di_{\text{підв}}}{dt} = U_{\text{підв}} - Vi_{\text{підв}} - \frac{dL_{\text{підв}}}{dx} i_{\text{підв}} - R_{\text{підв}} i_{\text{підв}} - V \frac{d\psi_{0\text{підв}}}{dx}; \\ m \frac{dx}{dt} = i_{\text{віб}} \frac{d\psi_{0\text{віб}}}{dx} + \frac{1}{2} \frac{dL_{\text{віб}}}{dx} i_{\text{віб}}^2 - F_{\text{підв}} - V(c_{\text{віб}} + c_{\text{підв}}) - kx; \\ \frac{dx}{dt} = V, \end{cases} \quad (2)$$

де $L_{\text{віб}}$ – індуктивність вібратора, $-82.227x^2 + 0.1104x + 0.5969$ Гн; $L_{\text{підв}}$ – індуктивність підвісу,



б

Рис. 3

$-67732x^4 + 6.243x^3 + 33.4x^2 + 0.002x + 0.085$ Гн; $U_{\text{віб}}$ – напруга живлення вібратора, $\sqrt{2} \cdot 15f \sin(2\pi ft)$ В; $U_{\text{підв}}$ – напруга живлення підвісу, 200 В; m – маса рухомої частини, 42 кг; $c_{\text{віб}}$ – коефіцієнт демпфування вібратора, 1420 кг/с; $c_{\text{підв}}$ – коефіцієнт демпфування підвісу, 583 кг/с; k – приведений коефіцієнт жорсткості пружин, 267200 Н/м; $R_{\text{віб}}$ – опір в колі вібратора, 9 Ом; $R_{\text{підв}}$ – опір в колі підвісу, 16,6 Ом; $F_{\text{підв}}$ – сила тяги підвісу, $4132.67i_{\text{підв}}x + 134820x$ Н; x – зміщення рухомої частини, мм; V – швидкість рухомої частини, м/с; $i_{\text{віб}}$ – сила струму в колі вібратора, А; $i_{\text{підв}}$ – сила струму в колі підвісу, А.

Система розв'язувалась чисельно за допомогою системи комп'ютерної алгебри *Octave* [9]. На рис. 4 показані графіки залежності амплітудних значень зміщення (X) від частоти при $U_{\text{віб}}/f = \text{const}$ та $U_{\text{підв}} = \text{const}$ (а - графік для випадку використання вібратора з механічними пружинами, б - для випадку використання вібратора з механічними пружинами та магнітним підвісом при $U_{\text{підв}} = 200$ В).

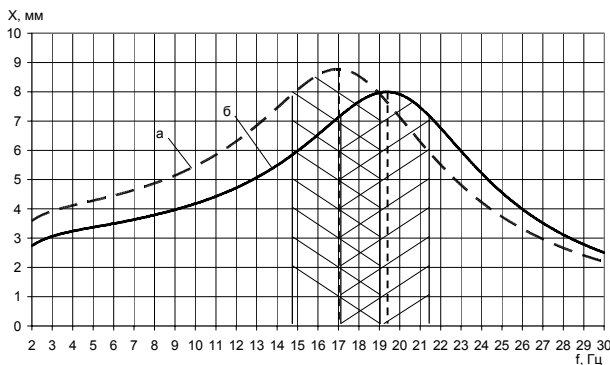


Рис. 4

На рис. 5 показаний графік залежності жорсткості магнітного підвісу від підведеної до нього потужності.

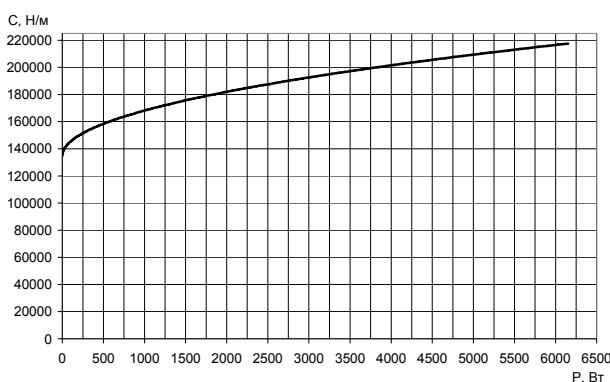


Рис. 5

ВИСНОВКИ

1. Розроблена конструкція електричного вібратора з МП дозволяє оперативно змінювати його електромеханічні параметри та резонансні властивості.

2. Різниця між значеннями резонансних частот для випадків використання вібратора з магнітним підвісом та без нього складає 2,4 Гц.

3. Найбільш ефективним буде застосування магнітного підвісу в тих технологічних процесах, де зміна власної частоти системи незначна.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П та ін. Вібробуджувач. Деклараційний патент на винахід №20031213225 від 17.01.2005.
- [2] Богаєнко М.В., Бондар Р.П., Голенков Г.М та ін. Вібробуджувач. Деклараційний патент на корисну модель №14111, заявка № а 2005 10789 від 15.11.2005.
- [3] J.F. Gieras, Z.J. Piech. Linear Synchronous Motors. Transportation and Automation Systems // CRC Press LIS Boca Ration. Florida, N.Y. Corporate Blvd., D.C. – 2000.
- [4] Бауман В.А., Быховский И.И., Гольдштейн Б.Г. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1970. – 547 с.
- [5] Богаєнко М.В., Бондар Р.П., Голенков Г.М та ін. Вібробуджувач. Деклараційний патент на корисну модель №24757, заявка № и 2007 02975 від 21.03.2007.
- [6] Азабель Г.Г., Блехман И.И., Быховский И.И и др. Вибрации в технике: Вибрационные процессы и машины. – М.: Машиностроение, 1981. – Т.4. – 509 с.
- [7] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 512 с.
- [8] <http://www.femm.foster-miller.net>
- [9] <http://www.octave.org>

Надійшла 29.07.2007

БАЗОВЫЕ УРАВНЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА Ш-ОБРАЗНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Загирняк М.В., д.т.н., проф.

Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского
Украина, 39614, Полтавская область, Кременчуг, ул. Первомайская, 20

Бранспиз М.Ю.

Востоchnoукраинский национальный университет имени Владимира Даля
Украина, 91034, Луганск, квартал Молодежный, 20-а, ВНУ им. В. Даля, кафедра электротехники

Отримано основні співвідношення між геометричними, магнітними та електричними параметрами Ш-подібного електромагніту, які дають можливість розв'язання задачі його синтезу.

Получены основные соотношения между геометрическими, магнитными и электрическими параметрами Ш-образного электромагнита, которые позволяют решить задачу его синтеза.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются Ш-образные электромагниты с осевой симметрией (электромагнитная шайба). Они нашли широкое применение в современном промышленном производстве, в частности на погрузочно-разгрузочных работах. На рис. 1 показаны основные элементы конструкции таких электромагнитов и их геометрические размеры. Определение этих размеров, наряду с электрическими параметрами обмотки намагничивания, и представляет собой задачу синтеза электромагнита. При этом электромагнит должен удовлетворять некоторому условию, соответствующему его функциональному назначению: обеспечение определенной подъемной силы.

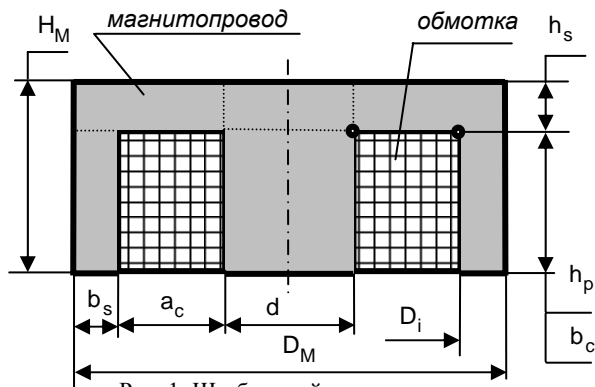


Рис. 1. Ш-образный электромагнит

В настоящее время в теории электрических аппаратов имеются общие методики решения задачи синтеза электромагнитов, которые представляют собой последовательность таких расчетов [1, 2]:

- определение магнитодвижущей силы обмотки намагничивания, обеспечивающей заданное значение параметра, определяющего функциональное назначение электромагнита (напряженность или индукция магнитного поля, магнитный поток, пондеромоторная сила);

- определение размеров обмоточного окна для обмотки намагничивания и размеров магнитопровода;

- определение электрических параметров обмотки намагничивания и параметров электрического провода (сечение провода, число витков).

Практическая реализация этих расчетов предполагает предварительное задание некоторых геометрических размеров электромагнита, кроме габаритных размеров. Это обуславливает некоторый произвол расчетчика при непосредственном решении задачи синтеза электромагнита. Как следствие, в настоящее время нельзя указать такую общую методику решения задачи синтеза электромагнитов, которую можно было бы применить к электромагниту любого типа без ограничений. Собственно, снятие соответствующих ограничений в частных случаях расчета какой-либо конкретной электромагнитной системы и представляет основную трудность при решении задачи синтеза для этой системы. Как следствие, непосредственное использование известных общих методик решения задачи синтеза для электромагнитов рассматриваемого типа (Ш-образные электромагниты) затруднительно.

Что же касается возможности использования известных методик решения задачи синтеза, разработанных для отдельных видов электромагнитов, то относительно них можно заметить, что в нашем случае они могут дать лишь общую последовательность расчета (ведь те или иные конкретные соотношения этих методик для рассматриваемого электромагнита будут другими). Причем эта общая последовательность расчета просто совпадает с указанной последовательностью расчетов, даваемой общими методиками решения задачи синтеза электромагнитов в теории электрических аппаратов.

Следует указать также на еще одну возможность решения задачи синтеза. А именно, многократное решение задачи анализа заданной электромагнитной системы с подбором численных значений параметров электромагнита, которые удовлетворяют условию создания заданного значения определяющего функционального параметра. Но этот подход является достаточно трудоемким (например, при численном расчете магнитного поля с помощью соответствующих программных продуктов [3]) и требует разработки рациональной стратегии подбора.

В данной работе показано, что для электромагнитных шайб можно все же указать такой порядок расчета, который позволяет достаточно просто и однозначно определить все его геометрические и электрические параметры.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С этой целью предварительно учтем, что на основе цепей размеров в аксиальном и радиальном направлениях (без учета технологических зазоров) для основных геометрических размеров системы (размеры D_M , d , D_i , b_s , H_M , h_s , h_p , b_c и a_c на рис. 1) имеют место следующие соотношения:

$$\begin{aligned} b_s &= 0,5(D_M - D_i), & D_i &= d + 2a_c, \\ h_s &= H_M - h_p, & h_p &= b_c. \end{aligned}$$

Если принять, что габариты электромагнита D_M и H_M заданы, то, поскольку приведенных уравнений имеется только четыре, для однозначного определения оставшихся семи размеров (размеры d , D_i , b_s , h_s , h_p , b_c и a_c) необходимо:

- либо задать предварительно численные значения трех размеров (соответствующие комбинации из трех размеров, очевидно, не должны содержать размеры, входящие все сразу в одно из приведенных геометрических соотношений);

- либо дополнить эти четыре соотношения еще тремя соотношениями, связывающими между собой геометрические размеры электромагнита.

Первая из указанных возможностей соответствует отмеченному выше произволу расчетчика при непосредственном решении задачи синтеза электромагнита. Поэтому эта возможность не может быть принята как основа общего решения задачи синтеза для рассматриваемого электромагнита.

Что же касается второй из указанных возможностей, то при ее реализации будем иметь семь соотношений, которые можно рассматривать как систему уравнений относительно неизвестных семи геометрических размеров (размеры d , D_i , b_s , h_s , h_p , b_c и a_c). При этом ввиду равенства числа неизвестных числу уравнений, ясно, что такая система уравнений имеет однозначное решение, которое, если его удастся найти, и будет искомым решением задачи синтеза рассматриваемого электромагнита (причем, однозначным решением).

Таким образом, все сводится к необходимости определения дополнительных соотношений между геометрическими размерами рассматриваемого электромагнита. Причем ясно, что эти искомые дополнительные соотношения не могут быть произвольными, а должны, очевидно, учитывать особенности физических процессов, происходящих в электромагните.

В качестве таких физических процессов, очевидно, следует рассматривать: процесс распределения магнитного потока в системе; тепловые процессы, вызванные прохождением электрического тока в обмотке намагничивания. При этом соответствующее рассмотрение необходимо осуществлять так, чтобы всегда имелась возможность определить вводимые дополнительные параметры, характеризующие указанные физические процессы.

Установление соответствующих этим процессам дополнительных соотношений и порядка их применения (чтобы задача синтеза имела решение, приемле-

мое для практического применения) и является решаемой далее задачей.

2. УСЛОВИЕ РАВЕНСТВА ПЛОЩАДЕЙ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗА МАГНИТОПРОВОДА

Прежде всего, учтем, что магнитопровод электромагнита служит для того, чтобы направлять магнитный поток без потерь в его рабочую зону (пространство под центральным полюсом, рис. 1). Для этого, очевидно, достаточно, чтобы площадь сечения магнитопровода по всей длине пути магнитного потока была одинаковой и равной площади сечения центрального полюса. Соответствующий путь замыкания основного магнитного потока по железу магнитопровода показан на рис. 2 (светлые стрелки).

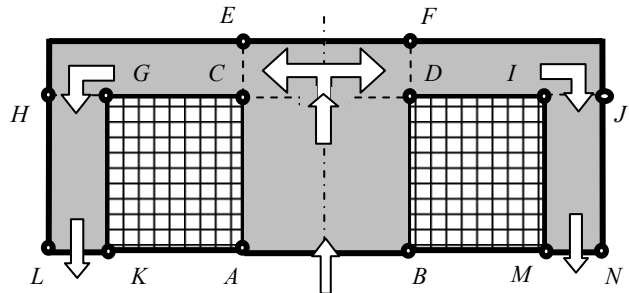


Рис. 2. Путь замыкания магнитного потока по магнитопроводу Ш-образного электромагнита

На рис. 2 указаны также основные сечения, для которых должно быть обеспечено равенство их площадей:

- сечения главного полюса у его основания и на торце (соответственно, сечения CD и AB), площади которых определяются выражением

$$S_{circle AB} = S_{circle CD} = \pi \frac{d^2}{4};$$

- сечение диска магнитопровода, образующее боковую поверхность цилиндра $CDEF$, площадь которой определяется выражением

$$S_{cylinder CDEF} = \pi d h_s;$$

- сечение боковых полюсов у основания и у торца, образующие кольцевые поверхности, соответственно, $HGJI$ и $LKMN$, площади которых определяются выражением

$$S_{ring HGJI} = S_{ring LKMN} = \pi \frac{D_M^2}{4} - \pi \frac{D_i^2}{4}.$$

Из равенства площадей указанных сечений, то есть из равенств

$$\begin{aligned} S_{circle AB} &= S_{circle CD} = S_{cylinder CDEF} = \\ &= S_{ring HGJI} = S_{ring LKMN}, \end{aligned}$$

можно записать следующих два независимых уравнения связи геометрических размеров рассматриваемой системы

$$\begin{aligned} \pi \frac{d^2}{4} &= \pi d h_s, \\ \pi \frac{D_M^2}{4} - \pi \frac{D_i^2}{4} &= \pi \frac{d^2}{4}. \end{aligned}$$

Первое из этих уравнений дает соотношение

$$h_s = 0,25d,$$

а второе уравнение может быть переписано (с учетом равенства $D_i = D_M - 2b_s$, рис. 1) в виде

$$4b_s^2 - 4D_M b_s + d^2 = 0,$$

который можно рассматривать как квадратное уравнение относительно размера b_s , что позволяет записать его решение в виде соотношения

$$b_s = 0,5 \left(D_M - \sqrt{D_M^2 - d^2} \right).$$

при записи которого учтено, что размер b_s не может быть больше чем $0,5D_M$, иначе тогда будем иметь отрицательное значение для размера диаметра центрального полюса d .

Таким образом, объединяя полученные решения с приведенными выше геометрическими соотношениями (полученными на основе цепей размеров), можно получить следующие шесть соотношений, связывающих между собой девять геометрических параметров рассматриваемой системы:

$$h_s = 0,25d, \quad b_s = 0,5 \left(D_M - \sqrt{D_M^2 - d^2} \right),$$

$$a_c = 0,25 \left(D_M + \sqrt{D_M^2 - d^2} \right) - 0,5d,$$

$$b_c = H_M - 0,25d, \quad h_p = H_M - 0,25d,$$

$$D_i = 0,5 \left(D_M + \sqrt{D_M^2 - d^2} \right).$$

Если заданы габаритные размеры D_M и H_M Ш-образного электромагнита, то, как видно из формы записи этих соотношений, они позволяют, определить остальные его геометрические размеры через один размер – диаметр центрального полюса d . То есть для однозначного решения задачи синтеза Ш-образного электромагнита достаточно установить размер центрального полюса, соответствующий условию обеспечения электромагнитом заданной подъемной силы.

3. РАСЧЕТНОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ ДИАМЕТРА ЦЕНТРАЛЬНОГО ПОЛЮСА

Из изложенного выше следует, что диаметр d центрального полюса должен быть таким, чтобы в магнитопроводе электромагнита можно было создать такой магнитный поток, который обеспечил бы требуемую подъемную силу. Причем этот магнитный поток не должен создавать магнитного насыщения в железе магнитопровода (общее условие для электромагнитов различного назначения [1, 2])

Последнее условие можно удовлетворить, если индукция магнитного поля в железе полюса будет менее такого значения, при котором магнитная проницаемость железа имеет максимальное значение. То есть индукция магнитного поля в железе полюса не должна превышать некоторого предельного допустимого значения B_0 (для литейной стали, которая используется в производстве подъемных электромагнитов, предельное значение индукции составляет ~ 1.5 Тл). Это предельное значение индукции и примем в

качестве расчетного значения индукции в центральном полюсе электромагнита.

Далее примем, что подъемная сила электромагнита F_0 в общем случае определяется по формуле [1, 2]

$$F_0 = 0,5\mu_0^{-1} B_p^2 S_p,$$

где μ_0 – магнитная постоянная; B_p – индукция магнитного поля на поверхности полюсов; S_p – суммарная площадь рабочей поверхности полюсов электромагнита.

Тогда, учитывая, что для рассматриваемого электромагнита

$$S_p = S_{circle\ ABJ} + S_{ring\ LKMN} = 2S_{circle\ ABJ},$$

а также принимая для него (в пренебрежении различия индукции на поверхности центрального полюса и в самом центральном полюсе, что является допустимым для рабочего состояния электромагнита)

$$B_p = B_0,$$

для расчета подъемной силы в нашем случае можно записать следующую формулу

$$F_0 = k_s \mu_0^{-1} B_0^2 S_{circle\ AB},$$

где k_s – коэффициент, учитывающий уменьшение рабочего магнитного потока с поверхности $S_{ring\ LKMN}$ за счет рассеивания.

В результате, для диаметра центрального полюса из последней формулы для силы F_0 несложно получить следующее выражение

$$d = 2B_0^{-1} \sqrt{(F_0 \mu_0) / (\pi k_s)},$$

которое позволяет однозначно определять диаметр центрального полюса по заданной подъемной силе и известным магнитным свойствам железа полюса (определяют индукцию B_0 и коэффициент k_s).

Таким образом, если заданы габариты электромагнитной шайбы D_M и H_M , то имеется возможность однозначного определения основных геометрических размеров ее, обеспечивающих заданную подъемную силу F_0 (определяем сначала диаметр центрального полюса, а затем определяем все остальные размеры электромагнита).

4. ОБ УРАВНЕНИЯХ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Известные размеры электромагнита позволяют решить однозначно и задачу определения магнитодвижущей силы обмотки намагничивания. В частности, это можно сделать на основе метода магнитных цепей.

Так, например, если пренебречь падением магнитного потенциала в железе магнитопровода и принять, что полный магнитный поток Φ_0 в рассматриваемой системе определяется выражением (здесь IW_0 – магнитодвижущая сила обмотки намагничивания, а Λ_Σ – суммарная магнитная проводимость воздушных промежутков между полюсами электромагнита)

$$\Phi_0 = \Lambda_\Sigma IW_0,$$

то, учитывая, что магнитный поток в этом случае определяется также выражением

$$\Phi_0 = B_0 \frac{\pi d^2}{4},$$

для магнитодвижущей силы обмотки намагничивания несложно получить следующее расчетное выражение

$$IW_0 = \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{\Lambda_{\Sigma}(d)} B_0,$$

в котором суммарная магнитная проводимость Λ_{Σ} обозначена как функция диаметра центрального полюса $\Lambda_{\Sigma}(d)$, поскольку эта проводимость определяется геометрическими размерами магнитопровода электромагнита, которые выше выражены все через диаметр d .

При этом проводимость $\Lambda_{\Sigma}(d)$ может быть определена, например, известным методом фигур Ротера [2], применение которого в рассматриваемом случае дает

$$\Lambda_{\Sigma}(d) = \Lambda_S + \Lambda_W + \Lambda_C,$$

где

$$\Lambda_S = 2\pi\mu_0 \frac{h_p}{\ln(D_i/d)}, \quad \Lambda_W = \mu_0 \frac{d^2}{D_i + b_s},$$

$$\Lambda_C = \mu_0 \frac{2}{2 + \pi} (d + a_c).$$

Если же учесть падение магнитного потенциала в железе магнитопровода, используя одноконтурную схему замещения магнитной цепи, то для расчета магнитодвижущей силы обмотки намагничивания можно получить (на основе применения закона полного тока к контуру, проходящему по пути основного магнитного потока [1, 2]) следующее расчетное выражение

$$IW_0 = \frac{\pi}{4} d^2 B_0 \left(\frac{1}{\Lambda_{\Sigma}(d)} + \frac{l_f(d)}{\mu(B_0)} \right),$$

где $\Lambda_{\Sigma}(d)$ – та же суммарная магнитная проводимость воздушных промежутков между полюсами электромагнита, которая была использована выше; $\mu(B_0)$ – магнитная проницаемость железа магнитопровода для принятого значения B_0 индукции в железе; $l_f(d)$ – длина магнитопровода по пути основного магнитного потока, которая может быть представлена через геометрические размеры магнитопровода как сумма (рис. 1, 2)

$$l_f(d) = 2h_p + a_c + h_s + 0,5d + 0,5b_s,$$

которая является функцией размера d , поскольку через него выше выражены все размеры электромагнита (кроме габаритных размеров), что и отображено в форме записи длины $l_f(d)$.

Следует отметить, что согласно разработанной в настоящее время теории магнитных цепей [1, 2] независимо от сложности принятой эквивалентной схемы магнитной цепи, ее расчет представляет собой решение одного уравнения (уравнение магнитной цепи). Ведь любая разветвленная эквивалентная схема маг-

нитной цепи может быть сведена к одноконтурной схеме замещения.

Заметим также, что решение уравнения магнитной цепи представляет собой уже задачу анализа электромагнитной системы (ее электромагнитный расчет, который при известных размерах системы может быть осуществлен стандартными аналитическими или численными методами).

Также стандартными методами может быть при этом (известное значение IW_0) решена и задача определения обмоточных данных обмотки намагничивания (сечение провода при заданном напряжении), решение которой основывается на соответствующей записи уравнения теплового равновесия в рассматриваемом электромагните. В этой связи укажем на практическую возможность отсутствия решения уравнения теплового равновесия, означающую, что в заданном габарите нельзя обеспечить требуемое значение магнитодвижущей силы обмотки намагничивания.

В заключение отметим, что, если рассматривать полученные соотношения между параметрами электромагнитной шайбы как уравнения ограничений, то ее расчет может быть осуществлен как решение некоторой задачи оптимизации (например, для критерия минимума потребляемой электроэнергии). Разработка методики решения такой оптимизационной задачи является целью дальнейшей работы авторов.

ВЫВОДЫ

Задача синтеза Ш-образного электромагнита при заданных габаритах его, может быть сведена к однозначному расчету характерных геометрических размеров электромагнита, позволяющих обеспечить заданную подъемную силу. При этом однозначно (с использованием стандартных методик) определяются и соответствующие электрические параметры обмотки намагничивания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Никитенко А.Г., Пеккер И.И. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах.– М.: Энергоатомиздат, 1985.– 216 с.
- [2] Электрические и электронные аппараты/ Под ред. Ю.К. Розанова.– М.: Энергоатомиздат, 1998.– 752 с.
- [3] Meeker D. Finite element method magnetics: User manual.– <http://femm.berlios.de>.– 2003.– 79 p.

Поступила 10.09.2007

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Лупиков В.С., д.т.н., проф., Серeda А.Г., к.т.н., доц., Литвиненко В.В.
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"
тел. (0572) 707-68-64, E-mail: lupikov@kpi.kharkov.ua.

Розглянута модернізація швидкодіючого автоматичного вимикача постійного струму високої напруги призначеного для захисту електрообладнання електровозів в аварійних режимах роботи.

Рассмотрена модернизация быстродействующего автоматического выключателя постоянного тока высокого напряжения предназначенного для защиты электрооборудования электровозов в аварийных режимах работы.

В быстродействующих автоматических выключателях, применяемых на железнодорожном транспорте [1] уменьшение времени размыкания контактов и ускорение их движения с целью повышения напряжения на дуге и, следовательно, токоограничивающей способности применены электромагнитные приводы удерживающего типа с размагничивающей шиной и отключающей пружиной. Недостатком этих выключателей является ограниченное время размыкания и движения контактов, вследствие большой инерции отключающей пружины. Кроме того, поляризованное исполнение не позволяет использовать выключатели в реверсивных силовых цепях (схемы рекуперации).

В выключателях ВАТ-48 на напряжение 1 кВ повышение токоограничивающей способности при аварийном отключении достигается применением индукционно-динамических приводов [2]. Недостатками этих выключателей являются: сложная кинематическая структура с защёлками, снижающая надежность, и однократный разрыв цепи главными контактами, ухудшающий токоограничивающую способность и затрудняющий их доработку для коммутации номинального напряжения электровозов – 3 кВ.

В наибольшей степени техническим требованиям рассматриваемых цепей отвечает выключатель, описанный в [3, 4]. В отличие от [2] выключатель имеет двойной разрыв цепи за счет применения контактной системы мостикового типа и надежную кинематическую структуру без защелок. Подвижный контакт мостикового типа обеспечивает два разрыва главной цепи, повышение напряжения на дуге и облегченные условия дугогашения. Электромагнитный привод оперативной коммутации удерживает главные контакты во включенном положении и позволяет исключить ненадежные механические защелки и блокировки. Индукционно-динамический привод аварийной коммутации, установленный на одной оси с электромагнитным приводом обеспечивает ускоренное движение подвижного контакта и эффективное токоограничение. Питание обмоток приводов осуществляется блоком управления, содержащим быстродействующие электронные ключи (тиристоры), подключающие обмотку электромагнитного либо индукционно-динамического привода к источнику питания. Быстродействующие ключи управляются датчиками максимального тока, установленными на вводной шине.

Недостатками этого выключателя являются:

- невозможность применения для коммутации напряжения 3кВ из-за пробоя воздушного промежутка между неподвижными контактодержателями через шток якоря индукционно-динамического привода. Увеличение же длины мостикового контакта значительно повышает габариты аппарата;
- якоря приводов находятся под напряжением, что снижает надежность и электробезопасность;
- отсутствие системы магнитного дутья для гашения дуги снижает токоограничивающую способность выключателя, а увеличение скорости расхождения контактов при отключении требует повышения энергии емкостного накопителя для питания приводов;
- низкий КПД индукционно-динамического привода приводит к необходимости применения повышенной энергии импульсных конденсаторов и, соответственно, габаритов, массы и стоимости аппарата;
- отсутствие защиты от перенапряжений, возникающих при отключении индуктивных цепей, снижает надежность защиты. При возникновении повышенных перенапряжений возможны повторные пробои между расходящимися контактами и затягивание горения дуги.

Преодоление указанных недостатков позволило бы использовать автоматический выключатель [3] для защиты электровозов постоянного тока в аварийных режимах работы. Повышение уровня изоляции между токоведущими частями традиционно достигается применением мостикового подвижного контакта поворотного типа [4]. В этом случае шток привода подвижного контакта выводится из области горения дуги. Применение системы магнитного дутья и введение блока ограничения перенапряжений позволяет увеличить токоограничивающую способность выключателя. Индукционно-динамические привода с магнитной системой обладают большим КПД, позволяющим снизить энергию емкостного накопителя, а, следовательно, его габариты, массу и стоимость.

Решение поставленных задач позволяет уменьшить габариты и массу выключателя, а также повысить надежность его работы и эксплуатации.

Проведем модернизацию базовой конструкции выключателя [3]. Усовершенствованная часть выглядит следующим образом (рис. 1):

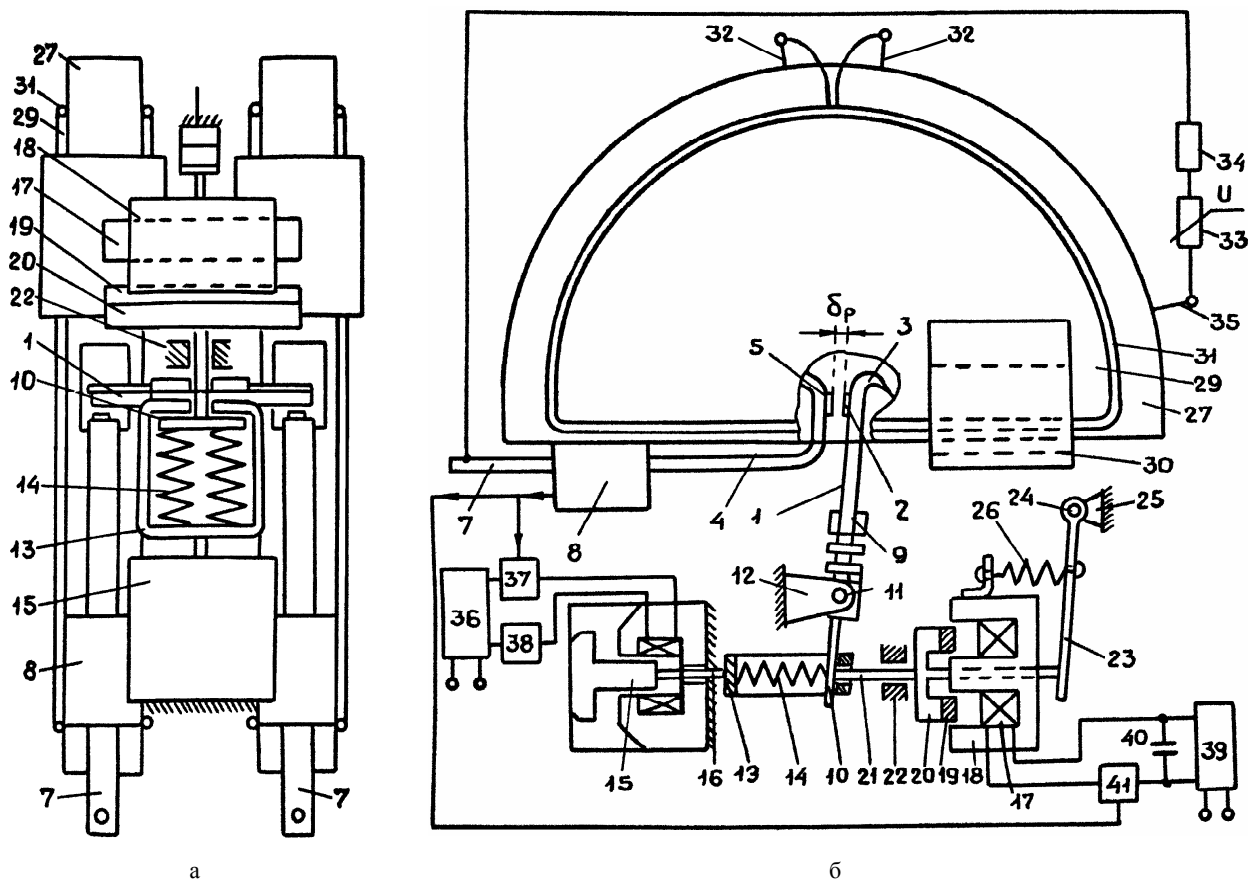


Рис. 1. Конструкция выключателя в отключенном состоянии

- контактная система содержит подвижный мостиковый контакт 1 мостикового типа, неподвижные контакты 4 с выводными шинами 7, неподвижные контакты 13, внутрь которой помещены пружины контактного нажатия 14;
- электромагнитный привод 15 служит для оперативной коммутации. Шток привода прижат к внешней поверхности обоймы 13;
- индукционно-динамический привод 18 аварийной коммутации установлен на одной оси с электромагнитным приводом 15 со стороны обоймы 13, противоположной расположению электромагнитного привода. Подвижная часть 20 индукционно-динамического привода жёстко связана со штоком 21, проходящим по оси симметрии приводов. Один конец штока жестко связан с рычагом 23 отключающей пружины 26;
- блок управления содержит датчик тока 8 и электронные ключи 37, 38, подключающие катушку электромагнитного привода к источнику питания 36. Ключ 37 выполнен быстродействующим с управлением от датчика 8, установленного на вводной шине 7 выключателя. Ключ 38 выполнен с дистанционным оперативным управлением. Электронный ключ 41 также управляется датчиком 8 и подключает катушку 17 индукционно-динамического привода к емкостному накопителю энергии 40;
- дугогасительные камеры 27 с деионными пластинами увеличивают падение напряжения на дуге;
- блок ограничения перенапряжений выполнен на элементах 33, 34.

Контактная система содержит подвижный мостиковый контакт 1, на концах которого установлены контактные напайки 2 и дугогасительные рога 3. Два неподвижных контактодержателя 4 с контактными напайками 5 жёстко связаны с выводными шинами 7. Подвижный контактодержатель 1 выполнен U-образной формы (рис. 2).

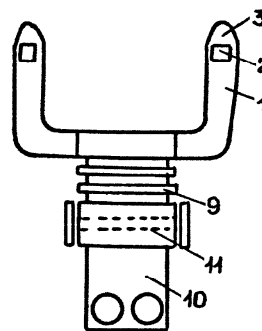


Рис. 2. Конструкция подвижной контактной системы

Изоляционная колодка 9 жёстко соединена с подвижным мостиковым контактом 1 и стальной пластиной 10. Колодка 9 выполнена с возможностью вращения на оси 11, укрепленной в неподвижных опорах 12. На шинах 7 установлены датчики тока 8. Внутри обоймы 13 установлены пружины контактного нажатия 14. Средняя часть мостикового контакта жёстко соединена с колодкой 9 с одной стороны, а пластина 10 жёстко крепится с другой стороны колодки. Колодка крепится на неподвижной оси 11,

перпендикулярной оси симметрии приводов и параллельной средней части мостикового контакта. Второй конец пластины 10 заходит внутрь обоймы 13 и прижимается пружинами контактного нажатия к внутренней части обоймы. За счёт того, что подвижная контактная система выполнена мостикового типа U-образной формы и жёстко связана с пластиной 10 через изоляционную колодку 9, обеспечивается повышение прочности электрической изоляции между контактной системой и приводом.

Дугогасительные камеры (рис. 3) устроены по принципу деионной решетки. Внутри изоляционного корпуса 27 радиально расположены деионные пластины 28. Применение радиального расположения пластин позволяет ускорить движение дуги за счет равномерного входа дуги в пластины и эффекта расширения сечения камеры. По бокам корпуса крепятся ферромагнитные пластины 29 системы магнитного дутья (рис. 4), соединенные между собой магнитопроводом 30. Катушки магнитного дутья 31 охватывают пластины 29. Для ускорения гашения путем равномерного распределения напряжения на дуге между обеими камерами одна катушка магнитного дутья присоединена к выводам двух деионных пластин 32 расположенных посредине своей камеры, а вторая к пластинам 32 посредине соседней камеры (рис. 5). Применение системы магнитного дутья позволяет

ускорить движение дуги, увеличить напряжение на ней и достичь существенного токоограничивающего эффекта при меньших габаритах камер, а также сохранить работоспособность при повреждении катушек и пластин. Расположение двух камер параллельно существенно снижает габариты выключателя.

При аварийном отключении индуктивных нагрузок в процессе интенсивного дугогашения могут возникнуть перенапряжения. При этом изоляция самого аппарата и отключаемой цепи подвергается опасным перегрузкам. Блок ограничения перенапряжений (рис. 3) традиционно состоит из последовательно включенного варистора 33 и резистора 34, присоединенных в каждой камере к выводной шине 7 и внешнему выводу деионной пластины 35. Пластина 35 расположена в части камеры, охваченной магнитопроводом 30. Применение варисторов позволяет устранить перенапряжения, возникающие в процессе гашения дуги. Включение резистора 34 повышает надёжность работы за счет исключения полного перехода тока в цепь варисторов. Исключение постоянного нахождения варисторов под напряжением в отключённом и включённом состоянии выключателя обеспечивается присоединением их к пластинам 35.

Привод оперативной коммутации 15 выполнен в виде прямоходового электромагнита, якорь которого через шток 16 жестко связан с обоймой 13.

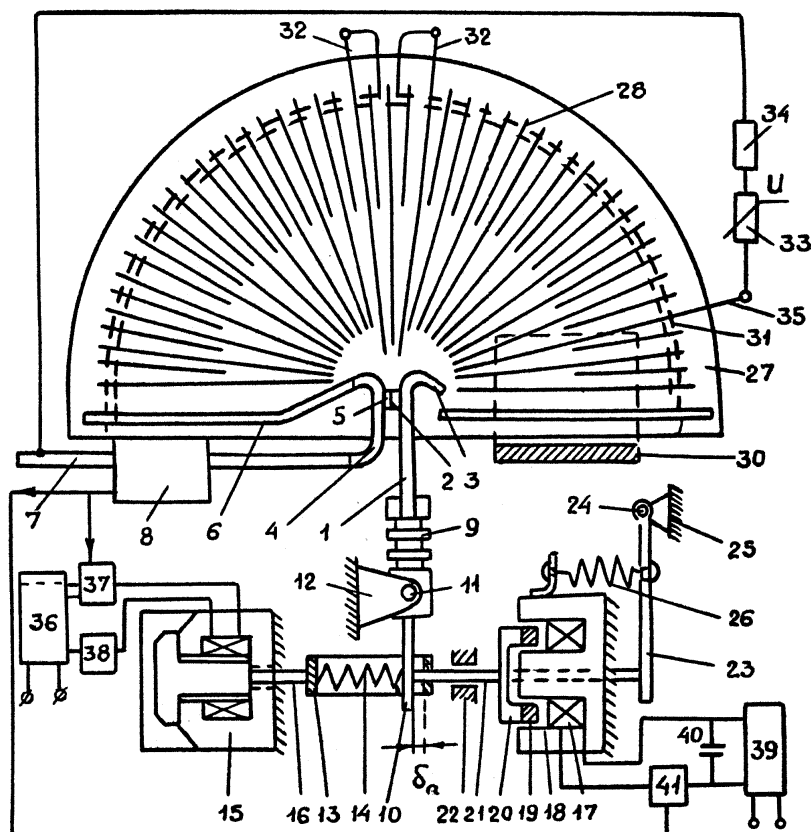


Рис. 3. Конструкция выключателя во включенном состоянии

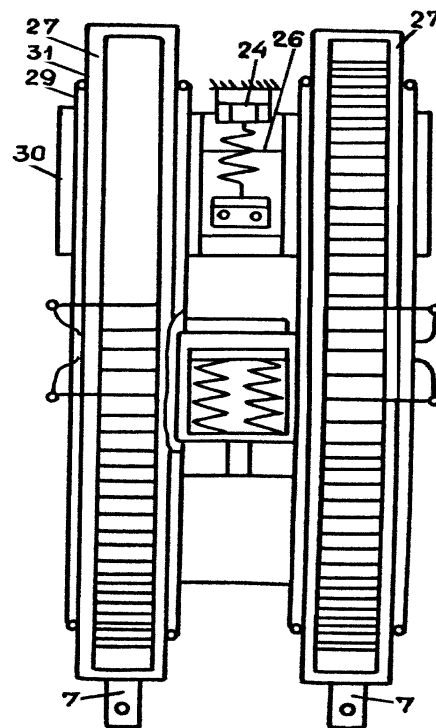


Рис. 4. Конструкция дугогасительных камер

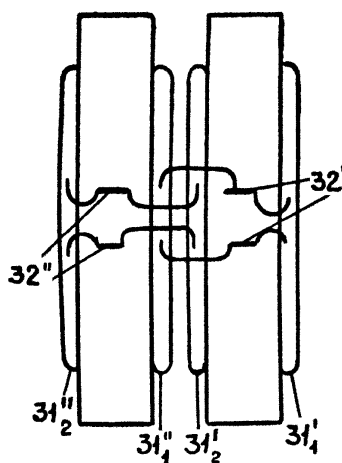


Рис. 5. Подключение катушек магнитного дутья

Привод аварийной коммутации выполнен индукционно-динамического типа. Катушка 17 располагается на среднем полюсе неподвижной шихтованной Ш-образной магнитной системы 18. Короткозамкнутый диск 19 охватывает средний полюс магнитной системы. Стальной якорь 20 жёстко скреплен с диском 19 и штоком 21. Шток проходит через отверстие в среднем полюсе, отверстие в неподвижной втулке 22 и отверстие в обойме 13. Рычаг 23, укрепленный на оси 24 может вращаться в неподвижных опорах 25. Пружина растяжения 26 связана с рычагом 23 и магнитной системой 18. Применение магнитной системы позволяет увеличить коэффициент взаимной индукции между катушкой и диском и, следовательно, увеличить электродинамическую силу, отбрасывающую диск. При заданном быстродействии это позволяет снизить энергию конденсаторов (ёмкость при заданном напряжении) и, следовательно, уменьшить габариты, массу и стоимость.

Блок управления состоит из двух источников питания. Источник 36 через электронные ключи 37 и 38 питает катушку электромагнитного привода. Источник 39 заряжает импульсные конденсаторы 40, которые через ключ 41 питают катушку 17 индукционно-динамического привода. Ключи 37, 41 выполнены в виде быстродействующих полупроводниковых коммутаторов, управляемых быстродействующим датчиком тока 8. Ключ 38 предназначен для дистанционного оперативного управления выключателем.

Выключатель работает следующим образом.

В отключенном состоянии (рис. 1) и подключенной внешней сети ключи 38 и 41 разомкнуты, а ключ 37 замкнут. Конденсатор 40 заряжен до напряжения источника 39. Катушки приводов обесточены. Пластина 10 прижата пружинами 14 к правой внутренней поверхности обоймы 13. Система из последовательных кинематически связанных узлов: рычаг 23, короткозамкнутый диск 19, якорь 20, шток 21, пластина 10, обойма 13 с пружинами 14, шток 16 и якорь электромагнитного привода 15 – смещена влево до упора якоря во внутреннюю стенку привода 15. Подвижный контакт повернут по часовой стрелке и контактные напайки 2 и 5 обоих полюсов разомкнуты. Величина контактного раствора δ_p определяется из условия гашения малых токов.

Включение выключателя происходит при подаче напряжения управления на ключ 38. Срабатывает электромагнитный привод, якорь которого, преодолевая действие пружины 26, через шток 16 перемещает обойму 13 вправо вместе с пластиной 10 и подвижным контактом. После замыкания контактов движение пластины 10 прекращается. Движение продолжают якорь привода 15, шток 16 и обойма 13 до упора якоря в ядро. Между пластиной 10 и правой внутренней поверхностью обоймы 13 образуется зазор δ_n (рис. 3), величина которого выбирается, исходя из необходимого провала контактов. Равномерное распределение усилия контактных пружин 14 на контактные напайки обоих полюсов обеспечивается исполнением оси 11 бочкообразной формы. При этом возможен поворот изоляционной колодки 9 вокруг оси симметрии. Во включенном состоянии по катушке электромагнитного привода 15 постоянно проходит ток от источника питания 36 через ключи 37 и 38.

Оперативное отключение выключателя осуществляется при снятии сигнала управления с ключа 38. Прекращается протекания тока через катушку электромагнитного привода 15. Вначале отходит якорь привода вместе со штоком 16 и обоймой 13 влево под действием пружин 14 (выбор провала) до соприкосновения пластины 10 с обоймой 13. Далее движение всей подвижной системы происходит под действием пружины 26 до упора якоря привода 15.

Аварийное отключение выключателя осуществляется при превышении током, протекающим через шины 7, значения тока уставки датчика 8. Датчик выдает сигналы управления на запаривание ключа 37 и включение ключа 41. Конденсаторы 40 разряжаются на катушку 17. В короткозамкнутом диске 19 наводится ток, противоположного направления току в катушке 17. Сила отталкивания между диском 19 и катушкой 17 приводит в движение якорь 20 со штоком 21 влево. Происходит ускоренный поворот пластины 10 вместе с контактной системой (колодка 9 и мостиковый контакт 1) по часовой стрелке и размыкание контактных напайки 2 и 5 в обоих полюсах. Вначале поворот контактной системы происходит без движения обоймы 13 с преодолением сил контактного нажатия. Далее при снижении тока в катушке привода 15 ниже тока отпускания якоря и после выбора провала вся подвижная система перемещается влево под действием пружины 26. Ток отпускания якоря привода 15 уменьшается с ростом контактного нажатия. После снижения тока в катушке привода 15 до нуля запирается ключ 38. Скорость поворота подвижной контактной системы определяется силой отталкивания между диском 19 и катушкой 17. Сила отталкивания определяется коэффициентом взаимной индукции между диском и катушкой. Применение магнитной системы 18 позволяет повысить коэффициент взаимной индукции и увеличить силу. Это обеспечивает возможность при заданном быстродействии уменьшить энергию разрядных конденсаторов 40.

Возникающая между контактами дуга вначале перемещается внутрь обеих камер под действием магнитного поля прилегающих контактодержателей и электродинамических сил втягивания дуги в магнит-

ную систему 30. Далее при достижении дугой пластин 32 в катушках 31 под действием напряжения дуги между пластинами 32 начинает увеличиваться ток. Этот ток вызывает магнитный поток Φ , проходящий между пластинами 29 и замыкающийся через магнитопроводы 30 в каждой камере (рис. 6).

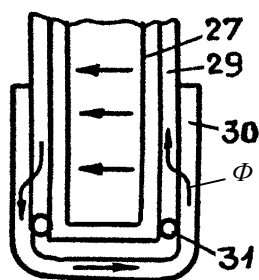


Рис. 6. Система магнитного дутья

Сила взаимодействия тока в дуге с магнитным потоком ускоряет движение дуги в камеру и разделение её на короткие дуги между деионными пластинами 28. За счёт суммы околоэлектродных падений напряжений коротких дуг и охлаждения дуги пластинами 28 общее напряжение на дугах внутри камер становится больше напряжения сети, что приводит к ограничению тока короткого замыкания и отключению цепи. Направление сил, действующих на дугу, определяется выбором направления намотки катушки 31, и не зависит от направления тока в сети, т.е. выключатель имеет неполяризованное исполнение.

Время включения катушек 31 магнитного дутья различно вследствие различного времени схода дуг с контактных напаяк. Это объясняется неоднородностью материалов и технологии изготовления контактов, а также различной скоростью движения катодных и анодных оснований дуг, в особенности при переходе с рога подвижного контакта на неподвижный рог внутри камеры. Это приводит к неравномерному росту напряжения на дуге в обеих камерах. Чтобы устранить этот недостаток, катушки магнитного дутья 31 включаются по схеме рис. 5. При таком включении при запаздывании, например, в возникновении напряжения на пластинах 32'' левой камеры её катушка 31₁'', подключенная к пластинам 32' правой камеры, будет ускорять движение дуги в левой камере. Вместе с тем, катушка 31₂'' будет создавать магнитное поле в своей камере. После появления напряжения на пластинах 32'' левой камеры будут включены катушки 31₂' и 31₁' и обеспечится взаимная "поддержка" в ускорении движения дуг. Таким образом, повышается надежность работы выключателя при обрыве одной катушки или при обгорании пластины 32 в одной из камер. Магнитное поле будет создаваться за счёт питания катушки от соседней камеры.

После уменьшения тока в сети датчик 8 прекращает выдачу сигнала. Это приводит к включению ключа 37. Так как ключ 38 заперт ранее, привод 15 повторно не срабатывает. После снижения тока в катушке 17 индукционно-динамического привода происходит запираание ключа 41 ("естественное" запира-

ние тиристора) с последующим повторным зарядом конденсаторов 40. В схеме выключателя предусмотрена блокировка, не позволяющая включить ключ 37 до полного заряда конденсаторов.

При возникновении перенапряжений, обусловленных индуктивностью отключаемой цепи, превышающих напряжение отпирания варистора 33, через него проходит часть тока главной цепи, ограничивая напряжение на дуге в каждой камере. Величина напряжения отпирания варистора выбирается по уровню допустимых кратковременных перенапряжений в сети и нагрузке. Резистор 34 предназначен для исключения полного перехода тока из цепи дуги в варистор. Это позволяет уменьшить рассеиваемую в варисторе мощность и уменьшить его габариты.

Включение варисторов непосредственно между выводными шинами или между контактами выключателя привело бы к постоянному росту тока утечки. Это снижает надежность работы и может вызвать тепловой пробой. Включение варистора в каждую камеру между выводной шиной и деионной пластиной, расположенной в камере со стороны подвижного контакта, позволяет устранить приложение напряжения сети к варистору после гашения дуги. При этом обеспечивается электробезопасность обслуживающего персонала за счет отсутствия гальванической связи между сетью и нагрузкой через ток утечки варистора.

ВЫВОДЫ:

1. Применение подвижной контактной системы мостикового типа U-образной формы с жёстко связанной изоляционной колодкой обеспечивает повышение электрической изоляции между контактной системой и приводом и позволяет применять автоматический выключатель для защиты сетей номинального напряжения 3кВ.
2. Применение индукционно-динамического привода аварийного отключения позволяет уменьшить время размыкания главных контактов и повысить токоограничивающую способность автоматического выключателя.
3. Применение Ш-образной магнитной системы позволило повысить КПД индукционно-динамического привода и уменьшить габариты и стоимость емкостного накопителя энергии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Голубев А.И. Быстродействующие автоматические выключатели. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 240 с.
- [2] Намитокон К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
- [3] Могилевский Г.В. Привод быстродействующих автоматических выключателей // ИВУЗ Электромеханика. – 1994. – №3. – С. 36-40.
- [4] Литвиненко В.В., Луников В.С., Середа А.Г. Повышение электрической изоляции межконтактного промежутка в быстродействующем автоматическом выключателе постоянного тока // Вісник НТУ "ХПІ". Тем. вип.: "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика" – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – №36. – С. 65-68.

Поступила 31.08.2007

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС В АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЕ

Мишин В.И., д.т.н., проф., Каплун В.В., к.т.н., доц., Макаревич С.С.
 Национальный аграрный университет
 Украина, 03041, Киев, ул. Героев обороны, 12
 тел. (044) 527-87-57

Наведена методика розрахунку характеристик асинхронного електромеханічного комплексу на базі компенсованих асинхронних машин в автономній системі, яка задовольняє будь-яким частковим випадкам сумісної роботи асинхронного генератора і асинхронного двигуна

Приведена обобщённая методика расчета характеристик асинхронного электромеханического комплекса на базе компенсированных асинхронных машин в автономной системе, которая удовлетворяет любым частным случаям совместной работы асинхронного генератора и асинхронного двигателя.

Принцип создания и действия компенсированных асинхронных машин (КАМ), особенности их конструкции и физических процессов, условия и возможности повышения эффективности представлены в ряде публикаций, в том числе [1, 2, 8].

Напомним лишь, что компенсированной называется асинхронную машину (АМ) с внутренней ёмкостной компенсацией реактивной мощности. При реализации одного из наиболее эффективных способов такой компенсации обмотка статора машины выполнена из двух одинаковых частей, пространственно смещённых относительно друг друга на некоторый угол Θ . Обычно угол Θ принимается $+30^\circ$ (в двигателях) или -30° (в генераторах), что легко осуществляется делением фазной зоны трёхфазной обмотки статора на две равные части). Обмотки статора, являясь обычными рабочими для АМ, соединяются по схеме поворотного автотрансформатора (АТ) на электрическую ёмкость C_Δ , ток которой I_Δ становится одновременно и током вторичной обмотки АТ. Электромагнитной связью с другими обмотками статора и ротора он создаёт в них дополнительные ЭДС $\dot{E}_{\Delta m} = -jx_m \dot{I}_\Delta$, которые перераспределяют токи и мощности между обмотками, изменяют фазы токов, их величины и т.п.

Шунтирование вторичной обмотки АТ дополнительной ёмкостью C_k усиливает эти эффекты. Компенсированная асинхронная машина с ёмкостью на выходе АТ и при шунтировании дополнительной ёмкостью вторичной обмотки АТ в определённой мере является обобщённой, так как при вариациях вносимых параметров (электрических ёмкостей) и размещения обмоток статора (изменения угла Θ) могут быть получены различные модификации КАМ, включая базовые серийные машины [3, 4, 5].

Во всех модификациях автономных асинхронных генераторов (ААГ) может быть использована и ёмкость C , включенная параллельно нагрузке на выходе генератора. Она служит для компенсации реактивной мощности нагрузки и частично (в компенсированном автономном асинхронном генераторе (КААГ)) или полностью (в автономном асинхронном генераторе (ААГ)) для возбуждения генератора).

В компенсированном асинхронном двигателе (КАД) [1] внутренняя ёмкостная компенсация снижает реактивные, а следовательно, и рабочие токи обмоток, потери электроэнергии в них, повышает внутренний $\cos\varphi$. Двигатель становится энергосберегаю-

щим, регулируемым по величине реактивной мощности, $\cos\varphi$, пусковых тока и момента.

В компенсированном автономном асинхронном генераторе [2] повышается степень жёсткости внешних характеристик (практически до стабилизации напряжения и частоты) с ростом нагрузки в пределах до номинальной, значительно увеличивается перегрузочная способность, достигается приемлемый уровень напряжения, что определяет возможность запуска от генератора асинхронного двигателя соизмеримой и даже одинаковой с ним базовой мощности.

В данной работе предлагается инженерная методика расчёта характеристик компенсированных асинхронных машин электромеханического комплекса в виде генератора и двигателя автономной системы в симметричном режиме установившегося или квазистановившегося процесса.

Вначале рассмотрим работу обобщённого компенсированного автономного асинхронного генератора (ОКААГ) на симметричную нагрузку, заданную в виде сопротивления $Z_n = r_n + jx_n = \text{var}$ при $\cos\varphi_n = \text{const}$. ОКААГ с двумя внутренними C_Δ и C_k ёмкостями и одной внешней C обладает максимальной возможностью воздействия на характеристики как самого генератора так и всей автономной электромеханической системы. В соответствии с электрической схемой ОКААГ (рис. 1а) расчётные уравнения электрического равновесия составляются для трёх основных (две обмотки статора и одна ротора) и одного дополнительного (шунтирование ёмкостью C_k вторичной обмотки АТ) контуров электрической цепи фазы:

$$\left. \begin{aligned} 1. \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jx_1 \cos\Theta \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{I} \cdot Z, \\ 2. \dot{U}_1 &= \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_1 \cos\Theta \cdot \dot{I}_1 - \dot{U}_{c\Delta}, \\ 3. \dot{U}_\Delta &= \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_1 \cos\Theta \cdot \dot{I}_1 = -jx_{ck} \dot{I}_{ck} \\ 4. 0 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2/S + jx_2). \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где \dot{U}_1 - напряжение на выходе генератора, $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jx_m (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta}) = -jx_m \dot{I}_0$ - ЭДС основной обмотки статора и приведённой к ней обмотки ротора, $\dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\Theta}$ - ЭДС дополнительной (вторичной для АТ) обмотки статора, \dot{U}_Δ - её напряжение, $\dot{U}_{c\Delta} = -jx_{c\Delta} \cdot \dot{I}_{c\Delta}$ - напряжение на выходе АТ (на ёмкости C_Δ); $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta}$ - намагничивающий

ток по отношению к основной ЭДС \dot{E}_1 , \dot{I}_1 , \dot{I}_Δ , \dot{I}_2 - токи соответственно основной, дополнительной обмотки статора и ротора, $\dot{I}_{c\Delta}$, \dot{I}_{ck} , \dot{I}_c - токи в электрических ёмкостях, соответственно C_Δ , C_k , C , с сопротивлениями $x_{c\Delta}$, x_{ck} , x_c , причём $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta - \dot{I}_{ck} = \dot{I}_H + \dot{I}_c$ - общий ток генератора, \dot{I}_H - ток нагрузки, $Z_1 = r_1 + jx_1$ - сопротивление ветви обмотки статора, r_1 - активное, x_1 - реактивное сопротивление рассеяния ветви, $Z_1 = Z_\Delta$, $x_1 \cos \Theta$ - реактивное сопротивление взаимоиндукции по полю рассеяния между ветвями обмоток собственной фазы,

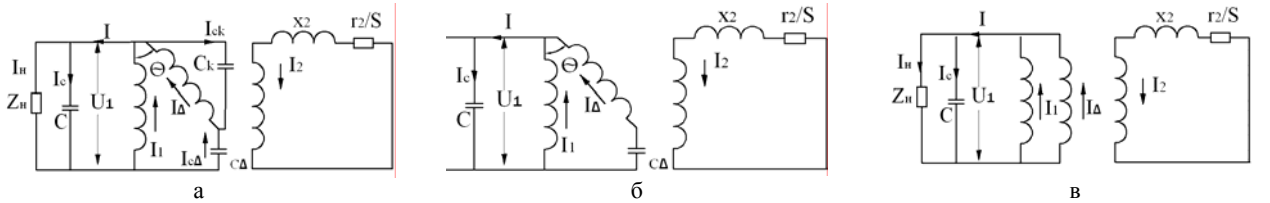


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы фазы модификаций автономного асинхронного генератора (ААГ) при работе на статическую нагрузку Z_H : а - обобщённый компенсированный автономный генератор (ОКААГ) при $x_{c\Delta} \neq 0$, $x_{ck} \neq 0$; $x_c \neq 0$; $\Theta \neq 0$; $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta} + \dot{I}_{ck}$, б - компенсированный автономный генератор (КААГ) при $x_{ck} = \infty$, $\dot{I}_{ck} = 0$, $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta}$, $x_{c\Delta} \neq 0$, $\Theta \neq 0$, в - автономный асинхронный генератор (ААГ) на базе серийной асинхронной машины; при $x_{c\Delta} = 0$, $\Theta = 0$, $\dot{I}_1 = \dot{I}_\Delta$

Основным энергетическим параметром автономного генератора в системе уравнений (1) является основная ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$, относительно которой и нужно выразить уравнения электрического равновесия двух главных контуров цепи статора с токами \dot{I}_1 и \dot{I}_Δ . При этом напряжение \dot{U}_1 на выходе генератора является искомой величиной и представляется как $\dot{U}_1 = \dot{I}Z$, ток дополнительной ёмкости из (1-3) равен $\dot{I}_{ck} = j \frac{\dot{E}_1 e^{j\Theta} - \dot{I}_\Delta Z_1 - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_1}{x_{ck}}$.

При этих условиях первые два уравнения (1 - 1,2) статорной цепи выразятся в виде

$$\begin{aligned} 1) a\dot{E}_1 &= b\dot{I}_1 + c\dot{I}_\Delta; \\ 2) d\dot{E}_1 &= e\dot{I}_1 + f\dot{I}_\Delta, \end{aligned} \quad (3)$$

где параметрические коэффициенты равны

$$\begin{aligned} a &= 1 + j \frac{Z}{x_{ck}} e^{j\Theta}; \quad b = Z_1 + Z \left(1 - \frac{x_1 \cos \Theta}{x_{ck}} \right); \\ c &= Z \left(1 + j \frac{Z_1}{x_{ck}} \right) + jx_1 \cos \Theta; \quad d = \left(1 + \frac{x_{c\Delta} + jZ}{x_{ck}} \right) e^{j\Theta}; \\ e &= Z + jx_1 \cos \Theta \left(1 + \frac{x_{c\Delta} + jZ}{x_{ck}} \right); \\ f &= Z_1 + \left(1 + \frac{x_{c\Delta} + jZ}{x_{ck}} \right) - jx_{c\Delta} + Z, \quad k_c = 1 + \frac{x_{c\Delta}}{x_{ck}} \end{aligned} \quad (4)$$

Решением системы уравнений (3) токи обмоток статора представляются в виде

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_1 \cdot \gamma, \quad \dot{I}_\Delta = \dot{E}_1 \cdot \Delta$$

при

x_m - главное реактивное сопротивление обмоток, взаимоиндуктивной связи между ними. $Z = \frac{-jx_c \cdot Z'_H}{Z_H - jx_c} - r + jx$ - общее сопротивление нагрузки и ёмкости "С", его составляющие

$$r = \frac{x_c^2 r_H}{r_H^2 + (x_H - x_c)^2}, \quad x = -x_c \frac{r_H^2 - x_H x_c + x_H^2}{r_H^2 + (x_H - x_c)^2}, \quad (2)$$

$e^{j\Theta}$, $e^{-j\Theta}$ - поворотные множители, как коэффициенты приведения ЭДС, токов к оси соответствующей обмотки статора.

$$\begin{aligned} \gamma &\approx \frac{a \cdot f - c \cdot d}{b \cdot f - c \cdot e} \approx \frac{Z_1 k_c + Z \left(1 + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right) - Z e^{j\Theta} - jx_{c\Delta}}{(Z_1 k_c - jx_{c\Delta}) \cdot (Z_1 + Z) + Z_1 Z \left(1 + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right)}, \\ \Delta &\approx \frac{b \cdot d - a \cdot e}{b \cdot f - c \cdot e} \approx \frac{-Z + Z e^{j\Theta} \left(k_c + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right) + Z_1 k_c e^{j\Theta}}{(Z_1 k_c - jx_{c\Delta}) \cdot (Z_1 + Z) + Z_1 Z \left(1 + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right)} \end{aligned} \quad (5)$$

С целью некоторого упрощения выражений (5) значения γ и Δ определены без учёта поля рассеяния между полуобмотками фазы, то есть при $x_1 \cos \Theta = 0$.

Определяют также $\gamma + \Delta e^{-j\Theta} = \alpha = \alpha_a + j\alpha_i$ разделяя параметрический комплекс α на действительную и мнимую составляющие α_a и $j\alpha_i$.

Из условия электрического равновесия МДС и электромагнитных мощностей системы связь между токами её представляется равенством

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2, \quad (6)$$

где все токи могут быть выражены через основную ЭДС E_1 и параметры цепи как

$$\dot{I}_1 = \gamma \cdot \dot{E}_1, \quad \dot{I}_\Delta = \Delta \cdot \dot{E}_1, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1}{(r_2/S) + jx_2}, \quad \dot{I}_0 = j \frac{\dot{E}_1}{x_m}. \quad (7)$$

При подстановке (7) в (6) и сокращении на \dot{E}_1 получают уравнения равновесия параметров системы "автономный генератор - нагрузка" в виде

$$\alpha = \gamma + \Delta e^{-j\Theta} = \frac{j}{x_m} - \frac{1}{r_2/S + jx_2} \quad \text{или}$$

$$\frac{2(Z_1 k_c - Z \cos \Theta) + Z \left(1 + k_c + \frac{j2Z_1}{x_{ck}} \right) - jx_{c\Delta}}{(Z_1 k_c - jx_{c\Delta}) \cdot (Z_1 + Z) + Z_1 Z \left(1 + \frac{jZ_1}{x_{ck}} \right)} \approx \frac{j}{x_m} - \frac{1}{Z_2}. \quad (8)$$

Левая часть равенства (8) определяется собственными ($Z_1 = r_1 + jx_1$; Θ) и вносимыми ($x_{c\Delta}$, x_{ck} , Z) параметрами машины и представляет комплекс $\alpha = \alpha_a + j\alpha_i$; в правую часть входят сопротивления контура ротора $Z_2 = r_2/S + jx_2$ и намагничивающего контура x_m .

Разделив равенство (8) на действительные и мнимые составляющие из условия баланса действительных частей

$$\alpha_a = \frac{-r_2/S}{(r_2/S)^2 + x_2^2} \quad (9a)$$

находят r_2/S и S , а по балансу реактивных составляющих

$$\alpha_i = \frac{1}{x_m} + \frac{x_2}{(r_2/S)^2 + x_2^2} \quad (9b)$$

определяют x_m , удовлетворяющие заданной нагрузке и всем параметрам генератора.

Используя кривую намагничивания [5, 6] асинхронной машины по величине x_m находят ЭДС E_1 .

Располагая вектор $\dot{E}_1 = E_1$ по оси действительных чисел комплексной системы координат, принимают действительные и мнимые части комплексных токов и сопротивлений равными соответственно их активным и реактивным составляющим. По (7) определяют комплексные значения основных токов ОКААГ, затем другие величины, необходимые для расчёта и построения его характеристик.

Представленная система уравнений (1) и методика её расчёта для обобщённого компенсированного асинхронного генератора действительны и для других модификаций компенсированных автономных асинхронных генераторов (КААГ). Так возможен вариант расчёта КААГ при ёмкости $C = 0$ при $Z = Z_H$, $x_{c\Delta} \neq 0$, $x_{ck} \neq 0$. При исключении ёмкости C_k , шунтирующей вторичную обмотку АТ (рис. 1б) КААГ, кроме внешней ёмкости C , имеет только одну внутреннюю ёмкость C_Δ на выходе статорных обмоток АТ.

При $C_k = 0$, $x_{ck} = \infty$, $\dot{I}_{ck} = 0$, $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta}$ число электрических контуров и их уравнений электрического равновесия цепи генератора сокращается до трех:

$$\begin{aligned} 1. \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{I} \cdot Z, \\ 2. \dot{U}_1 &= \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_1 \cos \Theta \cdot \dot{I}_1 - \dot{U}_{c\Delta}, \\ 3. 0 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2/S + jx_2), \end{aligned} \quad (10)$$

а параметрические коэффициенты системы уравнений (3) принимают более простые по сравнению с (4) значения: $a=1$; $b = z_1 + z$; $c = z + jx_1 \cos \Theta$; $d = e^{j\Theta}$; $e = z + jx_1 \cos \Theta$; $f = z_1 + z - jx_{c\Delta}$. (10a)

Упрощаются выражения и для коэффициентов γ , Δ , α (5,8), но условия определения r_2/S , S , x_m по (8) и основной ЭДС E_1 с использованием кривой намагничивания остаются неизменными. По (7) опреде-

ляют токи генератора, по (10) напряжение \dot{U}_1 на выходе, затем другие величины. Для расчёта и построения необходимых характеристик расчёты повторяют для нескольких значений сопротивления Z_H нагрузки при постоянных $\cos \Phi_H$, x_c , $x_{c\Delta}$ или при изменении какой-либо из этих величин при постоянстве Z_H .

Исключение ёмкости C_Δ ($x_{c\Delta} = 0$) при $\Theta = 0$ преобразует машину в базовый вариант автономного асинхронного генератора (ААГ) [4, 5] с двумя соосными параллельными ветвями обмотки статора с одинаковыми их токами $\dot{I}_1 = \dot{I}_\Delta = \frac{\dot{I}}{2}$ (рис. 1в). Число электрических контуров и уравнений для них, как и в КААГ равно трём:

$$\begin{aligned} 1. \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jx_1 \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 (Z_1 + jx_1) = \dot{I} \cdot Z, \\ 2. \dot{U}_1 &= \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_1 \cdot \dot{I}_1 = \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta (Z_1 + jx_1), \\ 3. 0 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2/S + jx_2). \end{aligned} \quad (11)$$

при этом $\dot{E}_1 = \dot{E}_\Delta = \dot{E}_2 = -jx_m (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = -jx_m \dot{I}_0$, $Z_1 + jx_1 = r_1 + jx_1 + jx_1 = 2R_{1o} + j2x_{1o} = 2Z_{1o}$ - сопротивление параллельной ветви обмотки статора с учётом взаимноиндуктивной связи по полю рассеяния с другой параллельной ветвью своей фазы, $Z_{1o} = R_{1o} + jX_{1o}$ - параметры единой обмотки фазы статора [3].

ААГ является наиболее простым вариантом автономных асинхронных генераторов. Он не имеет внутренней ёмкостной компенсации ($x_{ck} = \infty$, $x_{c\Delta} = 0$), но имеет только внешнюю компенсацию с ёмкостью C , (x_c). Исходя из общности методики расчёта два уравнения статорной цепи представляют её токи $\dot{I}_1 = \dot{I}_\Delta$, как и в (7), через основную ЭДС \dot{E}_1 и параметрические коэффициенты, выражения которых максимально упрощены: $a = 1$; $b = z_1 + z$; $c = z + jx_1$; $d = 1$; $e = z + jx_1$; $f = z_1 + z$;

$$\gamma = \Delta = \frac{1}{2z + z_1 + jx_1} = \frac{1}{2(z + z_{1o})}, \quad (12)$$

$$\text{откуда } \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta = (\gamma + \Delta) \dot{E}_1 = \frac{\dot{E}_1}{z + z_{1o}}.$$

Определение r_2/S , S , x_m , E_1 и других величин производится аналогично предыдущему. Уравнение электрического равновесия цепи ротора в системах (1, 9, 11) одинаково для всех модификаций генераторов, оно однозначно определяет ток \dot{I}_2 ротора через свою ЭДС $\dot{E}_2 = \dot{E}_1$ и параметры роторной цепи как

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{r_2/S + jx_2} = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} = \frac{\dot{E}_1}{Z_2}, \quad Z_2 = \frac{r_2}{S} + jx_2.$$

Автономный асинхронный генератор с ёмкостным внешним возбуждением прост, дешёв, надёжен, но имеет крупный недостаток - с ростом нагрузки резко падает его напряжение и частота [4, 5, 8]. Компенсированные генераторы в значительной мере ослабляют этот недостаток, они повышают степень жёсткости внешних характеристик и диапазон устойчивой работы при набросе нагрузки [2, 8]. На рис. 2 для сравнения показаны внешние характеристики трёх

модификаций автономных асинхронных генераторов с различными вариантами ёмкостного возбуждения, выполненных на базе асинхронного двигателя 4А71В2, $U_H = 220$ В, $I_H = 2,4$ А. В варианте обобщён-

ного компенсированного генератора с ростом нагрузки от холостого хода до номинальной при $\cos\varphi_H = 0,8$ напряжение падает не более чем на 5%, а перегрузочная способность по току превышает двукратную.

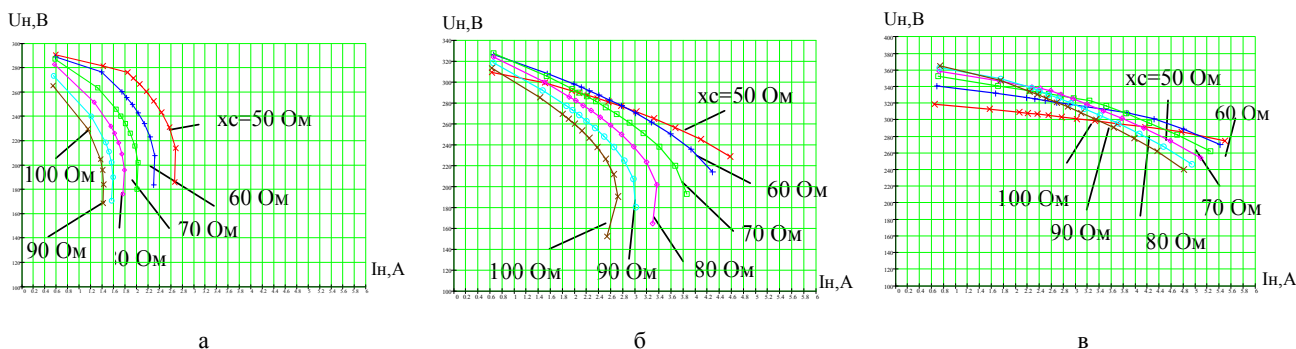


Рис. 2. Внешние характеристики автономных асинхронных генераторов: а – на базе асинхронного двигателя, б – компенсированный асинхронный генератор ($x_{c\Delta} = 50$) со смешанным ёмкостным возбуждением, в – обобщённый компенсированный асинхронный генератор с дополнительным возбуждением ($x_{c\Delta} = 50$, $x_{ck} = 100$)

Высокая перегрузочная способность компенсированных автономных генераторов и сохранение достаточной величины выходного напряжения при нагрузке определяют возможность удовлетворительного обеспечения наиболее тяжёлого для них режима пуска асинхронного двигателя соизмеримой мощности.

Представленный обобщённый метод расчёта характеристик автономных асинхронных генераторов при работе их на переменную нагрузку в установившемся процессе с достаточной для практики точностью можно распространить на некоторые динамические процессы, принимая их как квазиустановившиеся. Пуск асинхронного двигателя от автономного генератора с достаточной для практики точностью можно исследовать в квазиустановившемся процессе, как это делают, например, при расчёте системы "синхронный генератор – асинхронный двигатель" [7]. Такая возможность обеспечивается значительным превышением постоянной времени электрохимических процессов над постоянной времени электромагнитных переходных процессов, воздействием которых на электрохимические процессы во многих случаях можно пренебречь.

Расчёт характеристик асинхронного генератора при работе на асинхронный двигатель в автономной системе ведётся аналогично расчёту при работе генератора на статическую нагрузку Z_H , но с заменой сопротивления Z_H на полное сопротивление Z_d двигателя в квазиустановившемся процессе. Это сопротивление находится в сложной зависимости от скольжения S_d двигателя, его собственных и вносимых параметров, величины и знака угла Θ_d между полубмотками фазы статора и т.п. И, если в процессе разгона двигателя скольжение его задают в диапазоне $0 \leq S_d \leq 1$ (для условий машинного расчёта принимают $0,01 \leq S_d \leq 1$), собственные параметры $Z_{1d} = r_{1d} + jx_{1d}$, r_{2d} , x_{2d} и вносимые $x_{c\Delta d}$, x_{ckd} с достаточной степенью достоверности можно принять постоянными, то определение реактивного сопротивления x_{md} намагничивающего контура составляет особую сложность расчёта пусковых характеристик

двигателя.

В процессе пуска двигателя в автономной системе за счёт изменения скольжения S_d и сопротивления r_{2d}/S_d значительно изменяются его токи и напряжение, что уменьшает основной магнитный поток и основную ЭДС E_{1d} . В соответствии с кривой намагничивания увеличивается сопротивление x_{md} по сравнению с его номинальным значением x_{mn} при холостом ходе и номинальном напряжении машины.

При этом следует иметь в виду, что в автономной системе напряжение генератора \dot{U}_1 и двигателя \dot{U} едино, для генератора это выходное напряжение $\dot{U}_1 < \dot{E}_1$, для двигателя – входное $\dot{U}_1 > \dot{E}_{1d}$, причём $\dot{U} = -\dot{U}_1$, а $\dot{E}_1 > \dot{E}_{1d}$, $x_m < x_{md}$. Полные токи генератора \dot{I} и двигателя \dot{I}_d отличаются действием между ними тока \dot{I}_c внешней ёмкостной компенсации, $\dot{I}_d = \dot{I} - \dot{I}_c$.

Для определения сопротивления x_{md} намагничивающего контура двигателя как и в генераторе воспользуемся условием равновесия МДС или токов, которое для обобщённого компенсированного асинхронного двигателя (ОКАД) представляется как $\dot{I}_{1d} + I_{\Delta} e^{-j\Theta_d} = \dot{I}_{од} - \dot{I}_{2d}$ с той лишь разницей, что в генераторе из такого условия (6) определяют r_2/S , S , x_m , соответствующие заданной нагрузке (Z_H) и параметрам, а в двигателе при заданном скольжении S_d выражающем нагрузку, определяют $x_{m\partial}$ при соответствующих напряжении \dot{U}_1 , ЭДС \dot{E}_{1d} и параметрах.

Принцип расчёта характеристик асинхронных машин в автономном электрохимическом комплексе проведём на примере расчёта характеристик процесса пуска ОКАД от ОКААГ (рис. 3а). Основой для такого расчёта являются уже рассмотренные уравнения (1) электрического равновесия контуров цепи генератора и следующие уравнения двигателя:

$$\left. \begin{aligned} 1. \dot{U}_1 &= -\dot{E}_{1д} + \dot{I}_{1д} Z_{1д} + jx_{1д} \cos \Theta_{д} \cdot \dot{I}_{\Delta д} = \dot{I}_{д} \cdot Z_{д}, \\ 2. \dot{U}_1 &= -\dot{E}_{\Delta д} + \dot{I}_{\Delta д} Z_{\Delta д} + jx_{1д} \cos \Theta_{д} \cdot \dot{I}_{1д} + \dot{U}_{с\Delta д}, \\ 3. \dot{U}_{\Delta д} &= -\dot{E}_{\Delta д} + \dot{I}_{\Delta д} Z_{\Delta д} + jx_{1д} \cos \Theta_{д} \cdot \dot{I}_{1д} = -jx_{с\Delta д} \dot{I}_{с\Delta д} \\ 4. 0 &= \dot{E}_{2д} + \dot{I}_{2д} (r_{2д}/S_{д} + jx_{2д}). \end{aligned} \right\} (13)$$

при

$$\dot{E}_{1д} = \dot{E}_{2д} = -jx_{мд} (\dot{I}_{1д} + \dot{I}_{2д} + \dot{I}_{\Delta д} e^{-j\Theta_{д}}) = -jx_{мд} \dot{I}_{0д};$$

$$\dot{E}_{\Delta д} = \dot{E}_{1д} e^{j\Theta_{д}};$$

$$\dot{U}_{с\Delta д} = -jx_{с\Delta д} \cdot \dot{I}_{с\Delta д} = \dot{U}_1 - \dot{U}_{\Delta д} \approx \dot{E}_{\Delta д} - \dot{E}_{1д};$$

$$\dot{I}_{с\Delta д} = \dot{I}_{\Delta д} + \dot{I}_{с\Delta д}, \quad \dot{I}_{д} = \dot{I}_{1д} + \dot{I}_{\Delta д} + \dot{I}_{с\Delta д}.$$

Из уравнений (3,4) системы (13) выражаем

$$\dot{I}_{2д} = \frac{\dot{E}_{2д}}{r_{2д}/S_{д} + jx_{2д}} = \frac{\dot{E}_{1д}}{Z_{2д}} = \frac{jx_{мд}}{Z_{2м}} (\dot{I}_{1д} + \dot{I}_{\Delta д} e^{-j\Theta_{д}}),$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{с\Delta д} &= \frac{-j\dot{E}_{1д} e^{j\Theta_{д}} + j\dot{I}_{\Delta д} Z_{1д} - x_{1д} \cos \Theta_{д} \cdot \dot{I}_{1д}}{x_{с\Delta д}} \\ &= \frac{(jZ_S e^{j\Theta_{д}} - x_{1д} \cos \Theta_{д}) \cdot \dot{I}_{1д} + j(Z_S + Z_{1д}) \cdot \dot{I}_{\Delta д}}{x_{с\Delta д}} \end{aligned} \quad (14)$$

при $Z_S = jx_{мд} + \frac{x_{мд}^2}{Z_{2м}} = jx_{мд} \frac{Z_{2д}}{Z_{2м}}; Z_{1д} = Z_{\Delta д}.$

При представлении из уравнений (1,2) системы (13) токов $I_{1д}, I_{\Delta д}$ через напряжение \dot{U}_1 получаем

$$1) a_v \dot{U}_1 = b_v I_{1д} + c_v I_{\Delta д};$$

$$2) d_v \dot{U}_1 = e_v I_{1д} + f_v I_{\Delta д},$$

откуда $\dot{I}_{1д} = \gamma_v \cdot \dot{U}_1, \dot{I}_{\Delta д} = \Delta_v \cdot \dot{U}_1, \quad (15)$

где

$$\left. \begin{aligned} a_v &= d_v = 1; b_v = Z_{1д} + Z_S; \\ c_v &= Z_S e^{j\Theta_{д}} + jx_{1д} \cos \Theta_{д}; e_v = (Z_S e^{j\Theta_{д}} + jx_{1д} \cos \Theta_{д}) \cdot k_{с\Delta д} \\ f &= (Z_{1д} + Z_S) \cdot k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д}; k_{с\Delta д} = 1 + \frac{x_{с\Delta д}}{x_{с\Delta д}} \\ \gamma_v &= \frac{a_v \cdot f_v - c_v \cdot d_v}{b_v \cdot f_v - c_v \cdot e_v} = \\ &= \frac{(Z_{1д} + Z_S) \cdot k_{с\Delta д} - Z_S e^{-j\Theta_{д}} - jx_{1д} \cos \Theta_{д} - jx_{с\Delta д}}{(Z_{1д} + 2Z_S) Z_{1д} + x_{1д} \cos^2 \Theta_{д} (x_{1д} - j2Z_S) \cdot k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д} (Z_{1д} + Z_S)} \\ \Delta_v &= \frac{b_v \cdot d_v - a_v \cdot e_v}{b_v \cdot f_v - c_v \cdot e_v} = \\ &= \frac{Z_{1д} + Z_S - (Z_S e^{-j\Theta_{д}} + jx_{1д} \cos \Theta_{д}) \cdot k_{с\Delta д}}{(Z_{1д} + 2Z_S) Z_{1д} + x_{1д} \cos^2 \Theta_{д} (x_{1д} - j2Z_S) \cdot k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д} (Z_{1д} + Z_S)} \end{aligned} \right\} (16)$$

С учётом параметрических коэффициентов (16) и токов (14,15) полное сопротивление ОКАД может быть выражено через параметры его как

$$\begin{aligned} Z_{д} &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_{д}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_{1д} + \dot{I}_{\Delta д} + \dot{I}_{с\Delta д}} = \\ &= \frac{1}{\gamma \left(1 + j \frac{Z_S}{x_{с\Delta д}} e^{j\Theta_{д}} - \frac{x_{1д}}{x_{с\Delta д}} \cos \Theta_{д} \right) + \Delta \left(1 + \frac{Z_{1д} + Z_S}{x_{с\Delta д}} \right)} \end{aligned} \quad (17)$$

При разрешении токов $I_{1д}, I_{\Delta д}$ ОКАД из уравнений (1) и (2) системы (13) через основную ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ имеем

$$1) a_e \dot{E}_{1д} = b_e \dot{I}_{1д} + c_e \dot{I}_{\Delta д};$$

$$2) d_e \dot{E}_{1д} = e_e \dot{I}_{1д} + f_e \dot{I}_{\Delta д}, \text{ откуда } \dot{I}_{1д} = \gamma_e \cdot \dot{E}_{1д};$$

$$\dot{I}_{\Delta д} = \Delta_e \cdot \dot{E}_{1д}, \quad (18)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_e &= 1 - \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} e^{j\Theta_{д}}; b_e = Z_{1д} - Z_{д} \left(1 - \frac{x_{1д} \cos \Theta_{д}}{x_{с\Delta д}} \right); \\ c_e &= -jx_{1д} \cos \Theta_{д} - Z_{д} \left(1 + \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right); d_e = \left(k_{с\Delta д} - j \frac{Z_{д}}{x_{с\Delta д}} \right) e^{j\Theta_{д}}; \\ e_e &= jx_{1д} \cos \Theta_{д} \left(k_{с\Delta д} - \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right) - Z_{д}; \\ f_e &= Z_{1д} \left(k_{с\Delta д} - j \frac{Z_{д}}{x_{с\Delta д}} \right) - Z_{д} - jx_{с\Delta д}; \\ \gamma_e &= \frac{a_e \cdot f_e - c_e \cdot d_e}{b_e \cdot f_e - c_e \cdot e_e} \approx \\ &\approx \frac{Z_{1д} k_{с\Delta д} - Z_{д} \left(1 + \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right) + Z_{д} e^{j\Theta_{д}} - jx_{с\Delta д}}{(Z_{1д} k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д}) \cdot (Z_{1д} - Z_{д}) - Z_{1д} Z_{д} \left(1 + j \frac{Z_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right)}; \\ \Delta_e &= \frac{b_e \cdot d_e - a_e \cdot e_e}{b_e \cdot f_e - c_e \cdot e_e} \approx \\ &\approx \frac{Z_{д} - Z_{д} e^{j\Theta_{д}} \left(k_{с\Delta д} + \frac{jZ_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right) + Z_{1д} k_{с\Delta д} e^{j\Theta_{д}}}{(Z_{1д} k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д}) \cdot (Z_{1д} - Z_{д}) - Z_{1д} Z_{д} \left(1 + j \frac{Z_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right)} \end{aligned} \right\} (19)$$

Из уравнения равновесия МДС и токов ОКАД

$$I_{1д} + I_{\Delta д} e^{-j\Theta_{д}} = \dot{I}_{0д} - \dot{I}_{2д}; E_1 \text{ следует}$$

$$\begin{aligned} 2(Z_{1д} k_{с\Delta д} + Z_{д} \cos \Theta_{д}) - Z_{д} \left(1 + k_{с\Delta д} + \frac{j2Z_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right) - jx_{с\Delta д} \\ \frac{(Z_{1д} k_{с\Delta д} - jx_{с\Delta д}) \cdot (Z_{1д} - Z_{д}) - Z_{1д} Z_{д} \left(1 + j \frac{Z_{1д}}{x_{с\Delta д}} \right)}{x_{мд}} - \frac{1}{Z_{2д}} \end{aligned} \quad (20)$$

Отметим идентичность уравнений равновесия параметров генератора (8) и двигателя (20) лишь с заменой сопротивления Z в уравнении (8) генератора на $(-Z_{д})$ в уравнении (20) двигателя.

На основе изложенного анализа принимаем следующий порядок расчета полного сопротивления $Z_{д}$ асинхронного двигателя и сопротивления $X_{мд}$ намагничивающего контура его в процессе пуска от асинхронного генератора в автономной системе:

- принимают несколько значений скольжения двигателя в диапазоне $0,01 \leq S_{д} \leq 1,0$, достаточных для построения необходимых характеристик и для каждого значения $S_{д}$ определяют $Z_{2д} = r_{2д}/S_{д} + jx_{2д};$

- учитывая, что в двигателе $\dot{U}_1 = -\dot{E}_{1д} + \dot{I}_{1д} Z_{1д}$ и $\dot{E}_{1д} < \dot{U}_1$, а в начале пуска напряжение \dot{U}_1 и ЭДС $\dot{E}_{1д}$ резко падают, предварительно принимают (в соответствии с кривой намагничивания и предполагаемой величиной $E_{1д}$) $x_{мд} \geq x_{мн}$ и находят соответствующее сопротивление

$$Z_s = jx_{mд} \frac{Z_{2д}}{Z_{2м}} = jx_{mд} \frac{Z_{2д}}{Z_{2д} + jx_{mд}};$$

- при заданных $x_{сΔд}, x_{скд}, \theta_d$ для принятой точки S_d по (16) находят γ_v, Δ_v , затем по (17) определяют Z_d - полное сопротивление двигателя при заданных условиях;

- по найденному Z_d для принятого S_d из (20) находят $x'_{мд}$, которое сравнивают с предварительно принятым $x_{мд}$.

- при значительных расхождениях ($>3\%$) между принятым $x_{мд}$ и найденным $x'_{мд}$ принимают новые значения $X_{мд}$ и методом последовательных приближений добиваются их соответствия по (20);

- Z_d , удовлетворяющее $x_{мд} \approx x'_{мд}$ учитывают в

$$Z = \frac{-jx_c \cdot Z_d}{Z_d - jx_c}$$

при расчете характеристик генератора; - после определения всех токов генератора, двигателя, напряжений, момента двигателя, мощностей и т.п. строят соответствующие характеристики (в т.ч. внешние для генератора, механические для двигателя) при анализе которых делают вывод о возможности запуска двигателя соизмеримой с генератором мощности в автономной системе, оценивают технико-экономические показатели при работе системы и отдельных машин различных модификаций по компенсации реактивной мощности, базовых величин и др.

Предложенная методика расчета процесса пуска двигателя от генератора в автономной системе справедлива при любых вариациях компенсированных и базовых серийных асинхронных двигателей и генераторов.

На рис. 3 показаны варианты асинхронных машин одинаковых модификаций в автономном электромеханическом комплексе. На месте источника и потребителя может быть любая КАМ в качестве генератора от ОКААГ до ААГ, в качестве двигателя от ОКАД до базового АД. Возможны различные сочетания модификаций этих машин. Например, от ОКААГ возможен запуск ОКАД, КАД, АД базовых мощностей, меньших базовой мощности ОКААГ. Наиболее благоприятен режим пуска ОКАД от ОКААГ, в которых за счет применения внутренней емкостной компенсации улучшаются характеристики как генератора так и двигателя, что обеспечивает надежный запуск двигателя от генератора одинаковых базовых мощностей.

В общем случае в автономной системе обеспечивается удовлетворительный запуск двигателя при развитии им момента M больше момента M_c нагрузки на 10-15% во всех точках скольжения вплоть до $S_n + 0,01$, где S_n - скольжение двигателя при нагрузке в установившемся процессе, когда $M = M_c$ [8]. Расчет времени пуска и процесса нагрева машин проводят по принятым в электроприводе методикам.

Возможны и другие способы определения сопротивления $x_{мд}$ намагничивающего контура двигателя при изменении его скольжения, в частности при выражении токов обмоток статора его через напряжение и основную ЭДС одновременно и при совместном разрешении уравнений двигателя и генератора.

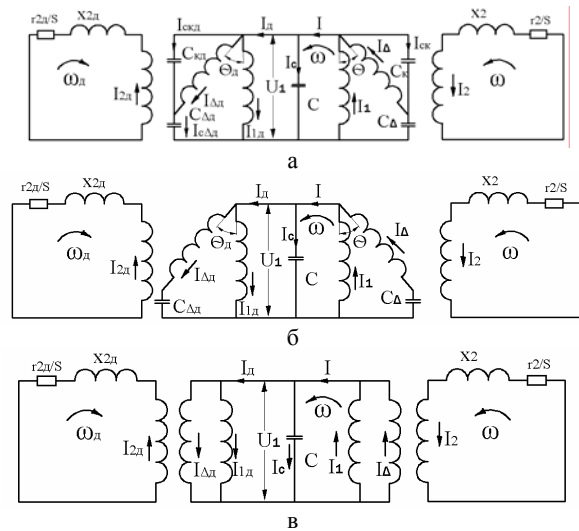


Рис. 3. Электромеханический комплекс в автономной системе с асинхронными машинами: а - обобщённые компенсированные автономный асинхронный генератор (ОКААГ) и асинхронный двигатель (ОКАД); б - компенсированный асинхронный двигатель (КАД) и компенсированный автономный асинхронный генератор (КААГ), в - автономный асинхронный генератор - асинхронный двигатель (АД)

Работа по совершенствованию компенсированных асинхронных машин и их совместному действию в автономных электромеханических комплексах продолжается. Результаты исследований и их анализ будут представлены в последующих публикациях авторов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мишин В.И., Лут Н.Т. Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулировочными характеристиками. // Вісник Національного технічного університету "ХП" №17. Харків - 2001. С. 110-112.
- [2] Мишин В.И, Каплун В.В. и др. Автономные асинхронные генераторы повышенной эффективности. Електрифікація та автоматизація сільського господарства №2-4, 2006, С. 41-51.
- [3] Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А.Э Кравчик., М.М. Шлаф и др. - М.: Энергоиздат, 1982. - 504 с.
- [4] Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. - 840 с.
- [5] Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. - М.: Высш. шк., 1982. - 272 с.
- [6] Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. - М.: Высшая школа, 1977. - 343 с.
- [7] Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей - М. - Л.: ГЭИ, 1963. - 528 с.
- [8] Методика розрахунку характеристик автономних асинхронних генераторів зі змішаним емісним збудженням (Мишин В.И, Каплун В.В. та ін.) НАУ. Київ - 2007, 44 с.

Поступила 03.09.2007

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН З ЯВНО ВИРАЖЕНИМИ ЗУБЦЯМИ ТА ШЕСТИФАЗНОЮ ОБМОТКОЮ НА СТАТОРІ

Панченко В.І., доц., Ципленков Д.В. канд. техн. наук, доц., Гребенюк А.М.
Національний гірничий університет
Україна, 49005, Дніпропетровськ, пр. К.Маркса, 19, НГУ, кафедра "Електричні машини"
тел. (056) 373-07-70, E-mail: tsyplenkovd@nmu.org.ua

Кириченко М.С.
Національний гірничий університет
Україна, 49005, Дніпропетровськ, пр. К.Маркса, 19, НГУ, кафедра "Електротехніки та метрології"

Розглянуто схему обмотки статора асинхронного двигуна з явно вираженими зубцями, яка дозволяє усунути шкідливу дію вищих (5-ої, 7-ої та інших) гармонік магнітної індукції. Обмотка має просту конструкцію та забезпечує високу ремонтоздатність двигуна.

Рассмотрено схему обмотки статора асинхронного двигателя с явно выраженными зубцами; которая исключает вредное действие высших (5-ой, 7-ой и др.) гармоник магнитной индукции. Обмотка имеет простую конструкцию и обеспечивает высокую ремонтоспособность двигателя.

Асинхронні двигуни з явно вираженими зубцями [1] у порівнянні з традиційними мають більш просту конструкцію, та завдяки тому, що зосереджені котушки обмотки розміщені на окремих зубцях, таку обмотку легко ремонтувати (треба тільки замінити пошкоджену котушку). Крім того, такі двигуни потребують менше обмоткового проводу.

Недоліком двигуна [1] є те, що магнітне поле в повітряному проміжку має явно виражений східчастий характер, що зводить до появи значних за амплітудою гармонічних складових (гармонік) магнітної індукції. При цьому виникають проблеми з пуском двигуна, зменшується ККД, збільшуються шум та вібрація.

В роботі [2] запропоновано конструкцію двигуна та схему обмотки статора, які частково усувають перелічені вище недоліки. Осердя статора такого двигуна (рис.1) складається із $12p$ аксіально розташованих зубців 1 (p -число пар полюсів), що зроблені у вигляді пакетів листів із електротехнічної сталі.

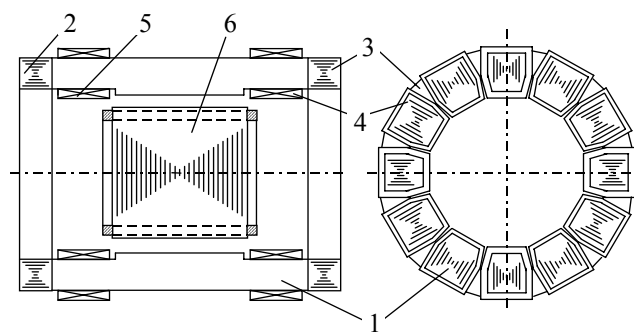


Рис. 1. Асинхронний двигун з явно вираженими зубцями

Внутрішні поверхні пакетів утворюють розточку статора, а їх бокові поверхні з'єднані кільцевими ярами 2, 3 навитими з холоднокатаної електротехнічної сталі. На зубцях з боку ярем, розташовані фазові обмотки 4, 5, кожна з яких складається із $2p$ котушкових груп. Групи між собою мають фазовий зсув в 180 електричних градусів і з'єднані послідовно-зустрічно. В свою чергу, кожна з котушкових груп складається із трьох послідовно з'єднаних котушок, числа витків яких знаходяться у співвідношенні $4:7:4$.

В просторі, вільному від котушок, всередині розточки, знаходиться ротор 6. Схема обмотки двигуна дає змогу значно зменшити амплітуди вищих гармонік магнітної індукції, в першу чергу п'ятої та сьомої. Однак, при цьому ускладнюється конструкція обмотки та утруднюється її ремонт, тому що на одних і тих же зубцях розміщуються котушки різних фаз.

Пропонується зберегти надзвичайно просту схему обмотки, притаманну конструкції [1], а вищі гармоніки магнітної індукції (5-ту, 7-му та інші) усунути застосуванням на статорі шестифазної обмотки [3]. Для реалізації такої обмотки статор двигуна повинен мати $12p$ зубців.

Конструкція двигуна зберігається такою, як на рис. 1. На кожному зубці з обох боків розміщують окремі зосереджені котушки, причому котушки, які розташовані на непарних зубцях, з'єднують між собою по схемі "трикутник" (рис. 2.) (фази A_1, B_1, C_1), а котушки парних зубців з'єднують між собою по схемі "зірка" (рис. 2.) (фази A_2, B_2, C_2). Котушки обох сторін зубців з'єднують між собою послідовно-зустрічно.

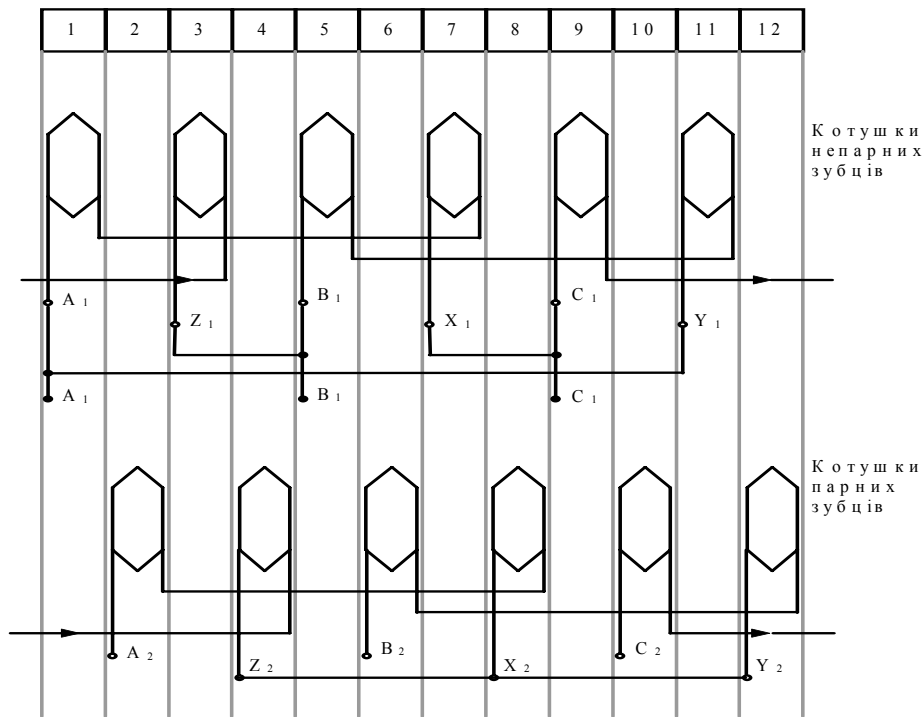


Рис. 2. Схема з'єднання котушок двигуна у шестифазну обмотку

Фазові напруги схем: "трикутник" $U_{\Delta} = 4,44f w_{\Delta} \Phi_{m\Delta}$, "зірка" $U_Y = 4,44f w_Y \Phi_{mY}$, де f – частота, w_{Δ} , w_Y – числа витків фаз, $\Phi_{m\Delta}$, Φ_{mY} – амплітуди магнітної індукції у повітряному проміжку. Відоме співвідношення $U_{\Delta} = \sqrt{3}U_Y$ при виконанні очевидної рівності $\Phi_{m\Delta} = \Phi_{mY}$ вимагає збільшення у $\sqrt{3}$ раз числа витків w_{Δ} порівняно з w_Y . При цьому фазовий струм схеми "трикутник" в $\sqrt{3}$ разів менше фазового струму схеми "зірка", що дозволяє відповідно зменшити поперечний переріз проводу обмотки у схемі "трикутник". При цьому об'єми провідникових матеріалів обох обмоток будуть однаковими. Обидві схеми, "трикутник" та "зірка", між собою вмикають паралельно, для чого початки відповідних фаз з'єднують між собою.

Фазова напруга в схемі "трикутник" є одночасно і лінійною; вона має часовий зсув по фазі в 30° відносно фазової напруги в схемі "зірка". Такий же зсув по фазі будуть мати у відповідних схемах намагнічуючі струми і магніторухливі сили обох обмоток.

З другого боку, просторовий зсув обмоток на один зубець при їх загальному числі $12p$ складає 30 електричних градусів, тобто маємо випадок, аналогічний шестифазній обмотці [3]. При цьому в сумарній МРС, в магнітній індукції двох обмоток A_1, B_1, C_1 , і A_2, B_2, C_2 зникають гармоніки номерів 5, 7, 17, 19, ..., що позитивно впливає на роботу двигуна. В даному випадку, порівняно з конструкцією [2], спрощується ремонт обмотки статора, тому що на кожному зубці знаходиться тільки одна котушка будь-якої фази. Пропоновану обмотку можна розглядати як розподілену з числом зубців на полюс і фазу $q = 2$; при

цьому коефіцієнт розподілу для основної гармоніки поля $K_{p1} = 0,966$. При $p = 1$ двигун повинен мати 12 зубців. Тоді кожна котушка займає в просторі розточка кут в 30° , що відповідає коефіцієнту укорочення $K_{y1} = 0,256$. Обмотковий коефіцієнт

$K_{об1} = K_{p1} \cdot K_{y1} = 0,25$. Для двигуна з $p = 1$ зроблено розрахунок довжини проводу фазової обмотки l у порівнянні з довжиною проводу фази l_0 двигуна традиційної конструкції. Одержано $l = 1,06l_0$, тобто витрати провідникових матеріалів дещо вищі порівняно з традиційною розподіленою в пазах статора обмоткою. Але здобутком є те, що спрощується конструкція двигуна і забезпечується можливість легкого ремонту обмотки статора. Останнє, зрештою, дає змогу одержати економію провідникових матеріалів на протязі терміну експлуатації двигуна.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Лушик В.Д., Штефан А.М. Асинхронный трехфазный двигатель с когтеобразными зубцами на статоре / Бесконтактные электрические машины, XI. - Рига.: Зинатне. 1972. - С. 256-290.
- [2] А.с.СССР, №1838863А3, кл.Н02к 17/22. Асинхронный трехфазный электродвигатель / В.И.Панченко, В.В. Панченко // Открытия. Изобретения. - 1993. - №32, - С 2.
- [3] Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. - Л.: Энергоатомиздат, 1989. - 400 с.

Надійшла 30.08.2007

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ СТАЛИ МАГНИТОПРОВОДА И ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В ОБМОТКЕ РОТОРА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Петрушин В.С., д.т.н., проф., Якимец А.М., к.т.н., доц., Каленик Б.В.
Одесский национальный политехнический университет
Украина, 65044, Одесса, пр-т Шевченко, 1, ОНПУ, кафедра "Электрические машины"
тел. (8-048) 779-74-94, 779-76-80, E-mail: victor_petrushin@ukr.net, yakimets@i.ua

Визначення параметрів заступних схем з урахуванням насичення сталі магнітопроводу і витиснення струму в обмотці ротора забезпечує уточнення розрахунку енергетичних показників регульованих асинхронних двигунів.

Определение параметров схемы замещения с учетом насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора обеспечивает уточнение расчета энергетических показателей регулируемого асинхронного двигателя.

Разработка асинхронных двигателей нового поколения, адаптированных к специфическим условиям эксплуатации в регулируемых электроприводах, не осуществима без математического описания электромагнитных, электромеханических, энергетических, тепловых и других процессов и формирования на базе этого описания математических моделей (ММ). Как правило, исследование характеристик регулируемых асинхронных двигателей (РАД) проводится без учета насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора. Параметры схемы замещения РАД в различных рабочих точках диапазона регулирования в значительной степени зависят от параметров питающей двигатель электроэнергией, поступающей от полупроводниковых преобразователей. Значения напряжений и частот определяются типами преобразователей и существенно меняются в каждой точке требуемого диапазона регулирования в зависимости от используемых видов регулирования, законов частотного управления. Для преобразователей напряжения, преобразователей частоты (ПЧ) с автономными инверторами напряжения и для непосредственных преобразователей частоты на входе двигателя при регулировании меняются величины и частоты подводимого напряжения (источник напряжения), для преобразователей частоты с автономными инверторами тока – величины и частоты тока инвертора (источник тока).

Характеристики РАД могут быть определены в результате анализа эквивалентной схемы замещения двигателя с переменными параметрами (рис. 1). В ней все сопротивления (индуктивные x_1, x_2, x_0 и активное

r_0), исключая активные сопротивления обмотки статора r_1 и обмотки ротора r_2' , изменяются пропорционально параметру регулирования частоты $\alpha = f_1/f_{1н}$, представляющему собой отношение текущей f_1 и номинальной $f_{1н}$ частот на выходе преобразователя. Кроме того, как переменные на рис. 1 изображены параметры, значения которых изменяются вследствие таких явлений, как насыщение стали магнитопровода и вытеснение тока обмотки ротора. Приведенное активное сопротивление обмотки ротора r_2' обратно пропорционально абсолютному скольжению, равному отношению текущей частоты тока в обмотке ротора f_2 к номинальной частоте преобразователя $\beta = f_2/f_{1н} = \alpha \cdot s$, где s – скольжение двигателя. Переменные параметры схемы замещения АД рассчитываются с учетом нелинейностей, связанных с насыщением магнитопровода и вытеснением тока в проводниках обмотки ротора. При использовании ПЧ – источников напряжения приложенное к двигателю напряжение оценивается относительной величиной параметра регулирования $\gamma_i = U_i/U_{1н}$ – отношением текущего и номинального напряжений питания двигателя, где i – номер закона. При использовании ПЧ – источников тока одновременно с изменением частоты меняется по определенному закону и величина статорного тока, т.е. параметром регулирования $\gamma_i = I_1/I_{1н}$ является отношение текущего I_1 и номинального $I_{1н}$ значений тока преобразователя. Законы частотного управления при использовании ПЧ – источников напряжения можно разделить на две группы [1, 2]. К первой группе относятся законы, связывающие величины и частоты

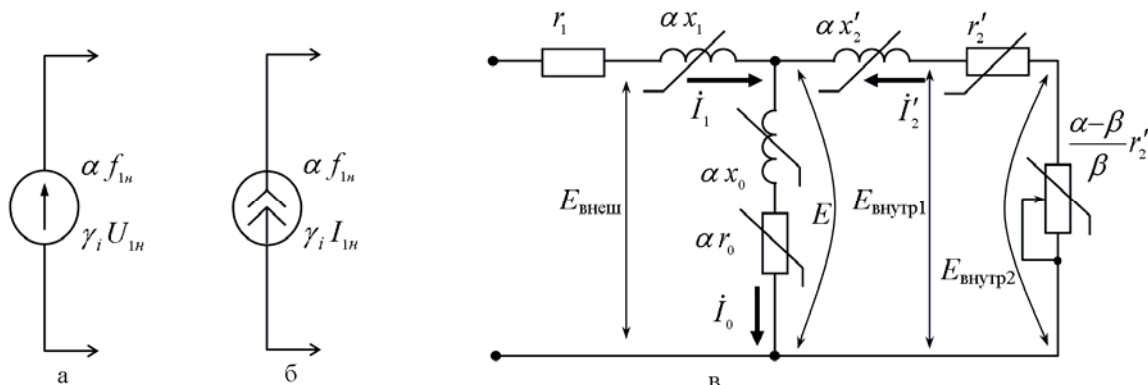


Рис. 1. Источники питания напряжения (а), тока (б) и схема замещения (в)

питающего двигателя напряжения ($U/f = \text{const}$, $U/f^2 = \text{const}$, $U/\sqrt{f} = \text{const}$ и др.). Ко второй – законы, обеспечивающие постоянство различных магнитных потокоцеплений электрической машины: статора Ψ_1 (соответствующее постоянству $E_{\text{внеш}}/f$), воздушного зазора Ψ_0 (постоянству E/f), ротора Ψ_2 (постоянству $E_{\text{внутр1}}/f$). При законе управления $E_{\text{внутр1}}/f = \text{const}$ обеспечивается непосредственное управление моментом электродвигателя. При этом качество управления ЭП в статических и динамических режимах существенно повышается по сравнению с другими законами. Непосредственное управление мощностью на валу двигателя обеспечивается впервые предлагаемым законом [1], при котором поддерживается постоянство отношения $E_{\text{внутр2}}/f = \text{const}$, где $E_{\text{внутр2}} = E_{\text{внутр1}} - I_2' \cdot r_2'$ определяется с учетом падения напряжения на активном сопротивлении ротора.

При разработке общепромышленных двигателей серии 4А применялась методика в которой учёт насыщения магнитопровода осуществлялся за счёт введения дополнительного раскрытия паза статора, а учёт вытеснения тока в обмотке ротора базировался на представлении схемы замещения роторной обмотки в виде многозвенной цепи [3, 4]. Целесообразно эти же методики использовать при анализе работы РАД в определенном диапазоне регулирования с заданной нагрузкой на валу [5]. На кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета разработана программа DIMAS-Drive, с помощью которой рассчитываются характеристики АД с учетом изменений параметров схемы замещения в каждой рабочей точке диапазона регулирования [6].

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования энергетических показателей – КПД (η) и коэффициента мощности (χ) асинхронного двигателя 4А71А2У3, который работал на нагрузку с моментом 2 Н·м (79% от $M_{\text{ном}}$) в требуемом диапазоне регулирования 300 – 3450 об/мин. Питание двигателя

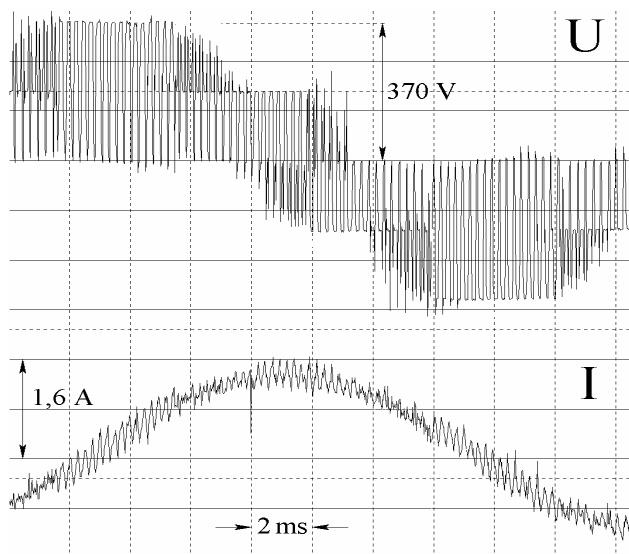


Рис. 2. Осциллограммы фазного напряжения и фазного тока РАД при питании от ПЧ в режиме холостого хода на частоте 40 Гц ($U = 185$ В, $I = 1$ А)

обеспечивалось транзисторным частотным преобразователем Altivar 28 Telemecanique. Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 400 В. Преобразователь имел следующие настройки: $U_{\text{ном}} = 230$ В и $f_{\text{ном}} = 50$ Гц, частота модуляции 4 кГц. Характеристики были получены для двух законов частотного управления $U/f = \text{const}$ и $\Psi_2 = \text{const}$. С целью определения энергетических показателей проводилось осциллографирование напряжения питания и потребляемого тока РАД и анализ их спектра. Осциллограммы вышеуказанных величин приведены на рис. 2. При определении коэффициента мощности РАД учитывалась полигармоничность выходного напряжения ПЧ [7].

На рис. 3 а, б представлены теоретические зависимости η , а на рис. 4 а, б теоретические зависимости χ от частоты вращения с учетом и без учета вытеснения и насыщения и экспериментальные зависимости этих же величин для двух анализируемых законов частотного управления.

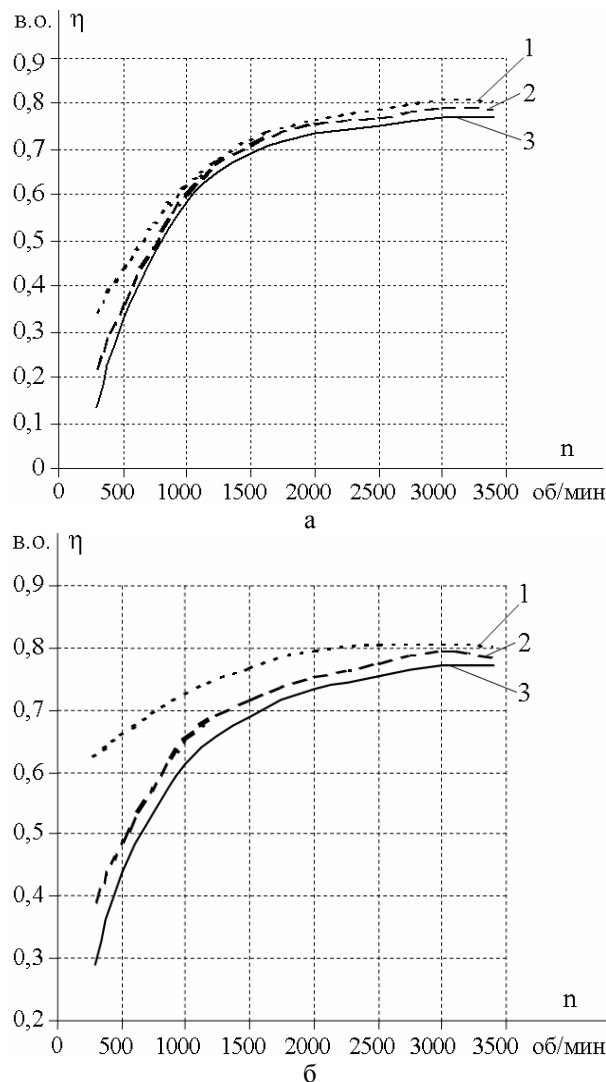


Рис. 3. Зависимость КПД от частоты вращения для законов частотного управления $U/f = \text{const}$ (а) и $\Psi_2 = \text{const}$ (б): 1 – без учета вытеснения и насыщения; 2 – с учетом вытеснения и насыщения; 3 – эксперимент

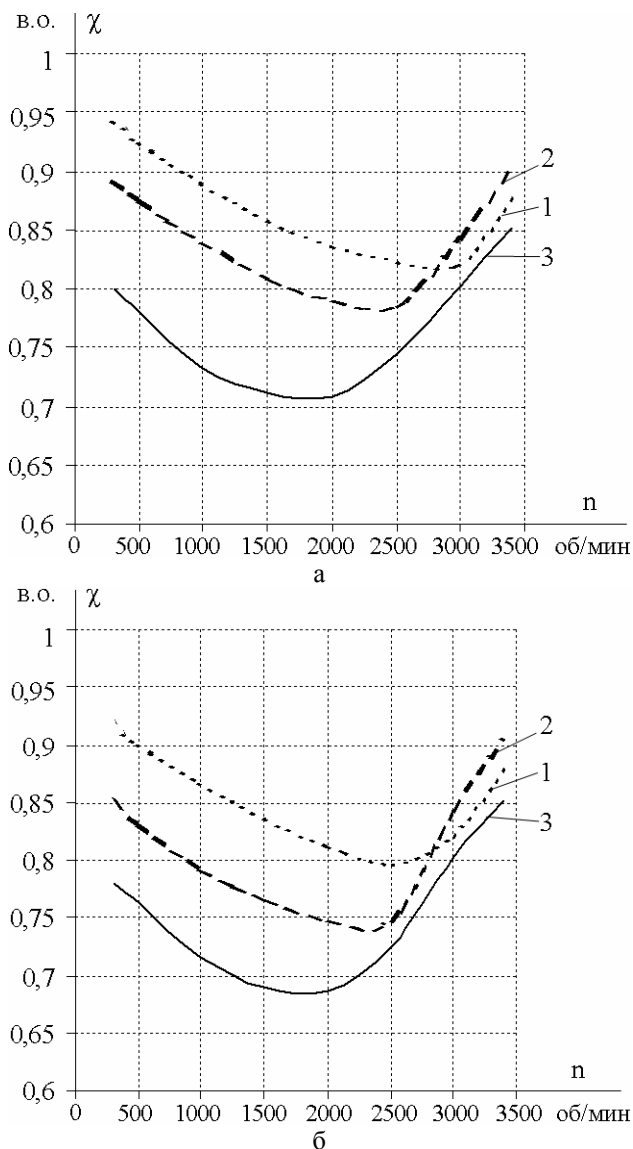


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности от частоты вращения для законов частотного управления $U/f = \text{const}$ (а) и $\Psi_2 = \text{const}$ (б): 1 – без учета вытеснения и насыщения; 2 – с учетом вытеснения и насыщения; 3 – эксперимент

При моделировании без учета вытеснения и насыщения в качестве параметров схемы замещения исследуемого двигателя использовались параметры, приведенные в справочнике [8], и их значения оставались неизменными в диапазоне регулирования.

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- погрешности вычислений η из-за неучета вытеснения и насыщения составляют при $U/f = \text{const}$ – 0,01 – 0,15, при $\Psi_2 = \text{const}$ – 0,013 – 0,22;

- погрешности вычислений χ из-за неучета вытеснения и насыщения в зоне ниже номинальной частоты составляют при $U/f = \text{const}$ – 0,01 ÷ 0,05, при $\Psi_2 = \text{const}$ – 0,01 ÷ 0,07;

- в зоне выше номинальной частоты методика учета вытеснения и насыщения при расчете χ нуждается в корректировке;

- неучет вытеснения и насыщения при законе $\Psi_2 = \text{const}$ вызывает большую погрешность при расчете

те энергетических показателей, чем при законе $U/f = \text{const}$;

- степень уточнения зависит от мощности, конструкции и исполнения двигателя. Так в двигателях с глубокими пазами в различных точках диапазона регулирования явление вытеснения проявляется существенно;

- аналогичным образом представляется возможным уточнить расчет энергетических показателей РАД в других системах регулируемых электроприводов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петрушин В.С. Регулировочные характеристики АД в частотном электроприводе при законах управления, обеспечивающих постоянства потокоцеплений // Электротехника і електромеханіка: Науково-практичний журнал. – 2002. – №2. – С. 53 – 55.
- [2] Петрушин В.С., Таньков А.А. Энергетические показатели асинхронного двигателя в частотном электроприводе при различных законах управления // "Електромашинобудування та електрообладнання": Респ. міжвід.наук.-техн. зб., вип. 55, 2000, С. 11 – 15.
- [3] Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.
- [4] Клоков Б.К. Расчет вытеснения тока в стержнях произвольной конфигурации // Электротехника. – 1969. – №9. – С. 48 – 51.
- [5] Лысенко С.И., Петрушин В.С., Слободниченко Б.И. Математическая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя при частотном регулировании. // Техн. електро-динаміка. – 1998. Спецвип. – С.31 – 36.
- [6] Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт "DIMASDrive". Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). Киев: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.
- [7] Петрушин В.С. Коэффициент мощности электрических нагрузок в автономных деформированных системах // Изв. ВУЗов "Енергетика", 1990, -№4. – С. 41-43.
- [8] Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др.; Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

Поступила 30.08.2007

РАЗРАБОТКА ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА БАЗЕ ШТАМПА СТАТОРА РЕАКТИВНОЙ МАШИНЫ

Радимов И.Н., к.т.н., доц.
 ООО "Завод "Электротехника"
 Украина, 54028, Николаев, ул. Новозаводская, 19
 тел. (048) 738-58-55, E-mail: nro@omsp.od.ua

Рымша В.В., д.т.н., проф., Гулый М.В., Процина З.П., Чан Тхи Тху Хыонг,
 Одесский национальный политехнический университет
 Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра электрических машин
 тел. (048) 738-58-55, E-mail: rimsha@omsp.od.ua

Розглянуто можливість виробництва вентильних двигунів з постійними магнітами при використанні штампів статора вентильно-реактивного двигуна.

Рассмотрена возможность производства вентильных двигателей с постоянными магнитами при использовании штампов статора вентильно-реактивного двигателя.

Завод "Электротехника" (г. Николаев), до недавнего времени специализировавшийся на выпуске асинхронных электродвигателей малой мощности, в этом году приступил к серийному выпуску новой продукции - регулируемых вентильно-реактивных двигателей (ВРД). На сегодняшний день освоено производство двух типоразмеров ВРД - с внешним диаметром 57 мм и 84 мм. В то же время одними из наиболее востребованных сегодня на рынке являются вентильные двигатели с постоянными магнитами (ВДПМ), обладающие, по сравнению с ВРД, лучшими рабочими характеристиками [1]. Производство ВДПМ в Украине практически отсутствует. Поэтому одной из задач, стоящих перед заводом "Электротехника", является освоение серийного выпуска ВДПМ. Учитывая, что штампы для вырубki листов статора и ротора ВРД уже готовы, для снижения себестоимости производства ВДПМ предлагается использовать готовые листы статора ВРД. Основной проблемой реализации ВДПМ в этом случае является прогнозируемое ожидание больших реактивных моментов, связанных с явнополюсной структурой статора ВРД. Исходя из этого, на примере двигателя с внешним диаметром 57 мм, оценим величину паразитных реактивных моментов и рассмотрим меры по снижению их влияния на результирующий электромагнитный момент.

Исходная вырубка листа статора ВРД имеет 8 зубцов ($Z_1 = 8$). При таком числе зубцов (пазов) статора для ВДПМ выполняем обмотку с числом фаз $m = 2$. Число полюсов ротора принято $2p = 6$. При этом соблюдается симметрия обмотки статора, имеющей дробное число пазов на полюс и фазу: $q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{2}{3}$.

Шаг обмотки по пазам: $y = m \cdot q - \varepsilon = 2 \cdot 2/3 - 1/3 = 1$, т.е. обмотка выполняется сосредоточенной катушечной с минимальными по длине лобовыми частями, как и обмотка статора ВРД (рис. 1).

Основные геометрические размеры исследуемого ВДПМ приведены в табл. 1.

Коммутация фаз ВДПМ производится с использованием силового транзисторного инвертора, построенного по схеме трехфазного моста (рис. 2).

Порядок включения транзисторов при повороте

ротора на 360 электрических градусов (120 механических градусов) в одном направлении приведен в табл. 2.

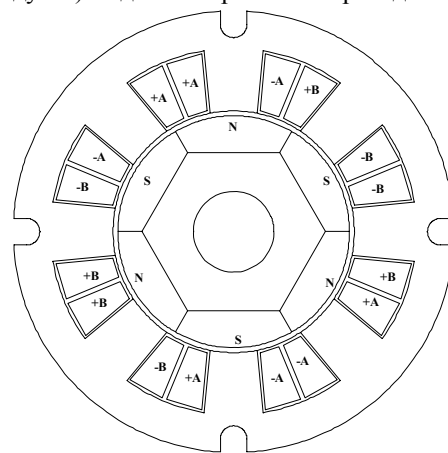


Рис. 1

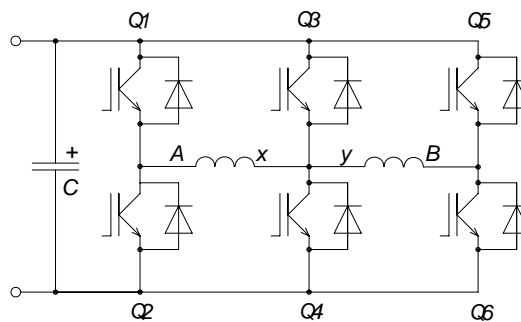


Рис. 2

Таблица 1

Внешний диаметр статора, мм	57
Внутренний диаметр статора, мм	29
Длина активной части, мм	28
Воздушный зазор, мм	0,6
Высота магнита, мм	4,5
Длина полюсной дуги статора, гр.	45

Таблица 2

Такты коммутации	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	+			+		
2				+	+	
3		+	+			
4			+			+

На роторе располагаются постоянные магниты из композиции NdFeB.

Рассматриваемый статор ВДПМ имеет открытые пазы, что приводит к неравномерному распределению магнитного поля и возникновению реактивного момента. На рис. 3 приведено распределение магнитного поля, созданного постоянными магнитами (холостой ход).

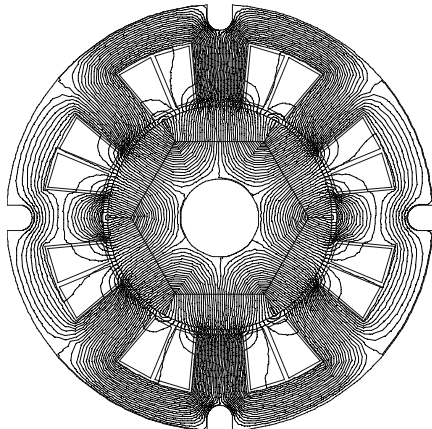


Рис. 3

Зависимости электромагнитного момента M от угла поворота ротора Θ при холостом ходе и наличии тока в одной из фаз статора при суммарной МДС катушки фазы, равной 70 А, показаны на рис. 4.

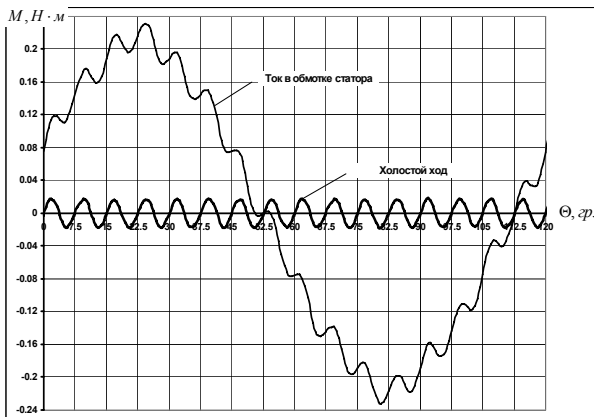


Рис. 4

Из рис. 4 видно, что пульсации момента с периодом приблизительно 7,5 механических градусов, имеющие место при холостом ходе, практически повторяются в кривой изменения момента при наличии тока в обмотке статора. Следовательно, подавление пульсаций момента при холостом ходе обеспечит улучшение формы кривой момента при наличии тока в статоре и ее приближение к синусоидальной форме. Для решения данной задачи возможно применение различных способов уменьшения уровня пульсаций реактивного момента.

Исходя из имеющихся на заводе "Электротехника" технологических возможностей ограничимся рассмотрением следующих:

- скос пазов статора;
- сдвиг магнитов на половине активной длины машины.

Скос пазов, с одной стороны, является одним из наиболее эффективных способов уменьшения пульсаций электромагнитного момента. С другой стороны этот способ приводит к усложнению технологии производства электродвигателя и, соответственно, к уве-

личению его стоимости.

Расчеты электромагнитного момента ВДПМ при углах скоса пазов статора от 4 до 8 градусов показали, что хорошее сглаживание пульсаций наблюдается при углах, близких к 7,5 градусам, а уменьшение либо увеличение угла скоса от 7,5 градусов приводит к ухудшению формы электромагнитного момента.

На рис. 5 приведены результаты расчета электромагнитного момента ВДПМ при холостом ходе, а на рис. 6 – при наличии тока в обмотке статора, при прямых пазах статора и при скосе пазов на угол 6 градусов, иллюстрирующие эффект применения скоса пазов статора.

В результате скоса пазов удалось более чем в 16 раз снизить амплитуду пульсаций электромагнитного момента на холостом ходе и, тем самым, обеспечить хорошее приближение к синусоиде также и момента при наличии тока в обмотке статора.

Следующей техникой, обеспечивающей снижение пульсаций электромагнитного момента, является сдвиг магнитов на роторе в несколько ступеней. Нами рассмотрен наиболее простой случай – двухступенчатый сдвиг на угол 3,75 градуса (рис. 7).

Принципиально возможно увеличение числа ступеней, но технологически это трудно выполнимо.

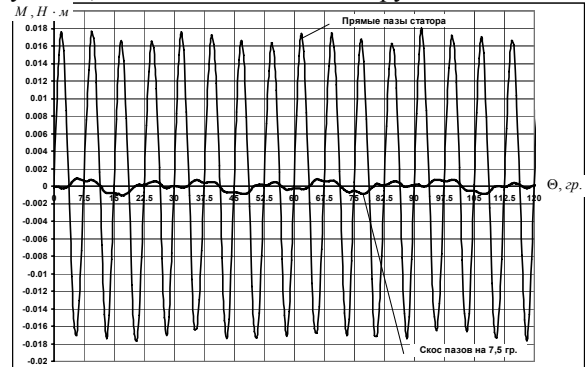


Рис. 5

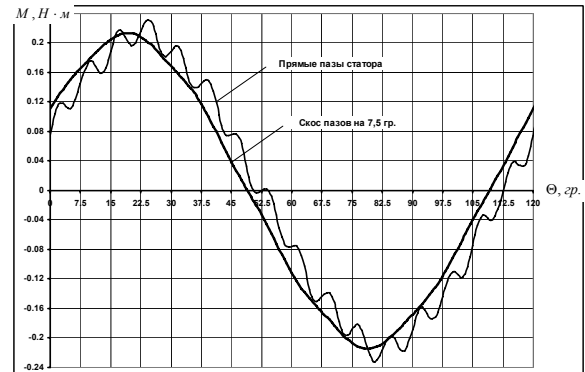


Рис. 6

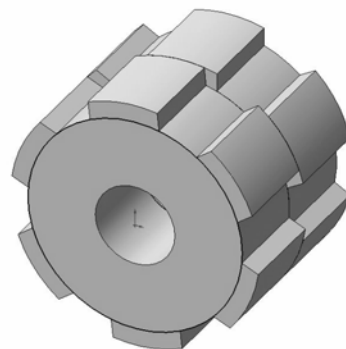


Рис. 7

Иллюстрацией воздействия двухступенчатого сдвига на изменение формы момента при холостом ходе являются данные рис. 8, а при наличии тока в обмотке статора – данные рис. 9.

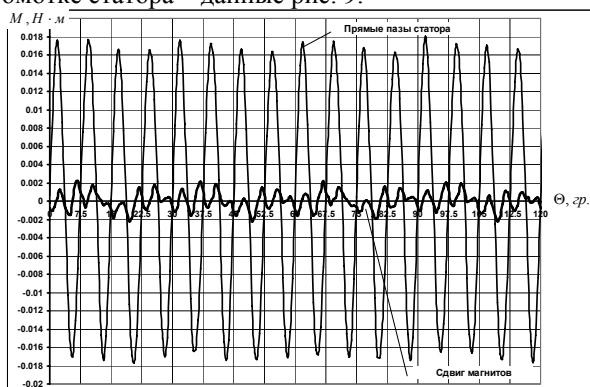


Рис. 8

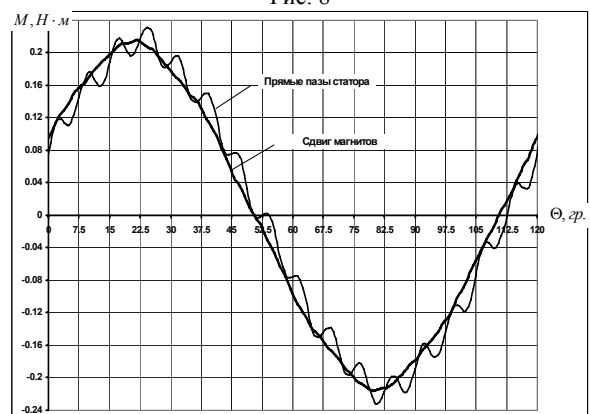


Рис. 9

Двухступенчатый сдвиг магнитов на роторе оказывается менее эффективным по сравнению со скосом пазов статора и уменьшает амплитуду пульсаций электромагнитного момента на холостом ходу лишь в 8 раз. Кроме того, форма этого момента далека от синусоидальной, что затрудняет устойчивую работу двигателя в зоне низких скоростей при малых нагрузках на валу.

Полученные теоретические результаты позволили спроектировать и изготовить ВДПМ с использованием листов статора ВРД, в котором выполнен скос пазов на 6 градусов. Внешний вид двигателя показан на рис. 10.



Рис. 10

При проведении испытаний электропривода с изготовленным ВДПМ были определены рабочие характеристики электропривода, а именно: механическая характеристика $\omega = f(M)$ (рис. 11), зависимость тока электропривода от момента $I = f(M)$ (рис. 12) и зависимость КПД электропривода от момента $\eta = f(M)$ (рис. 13).

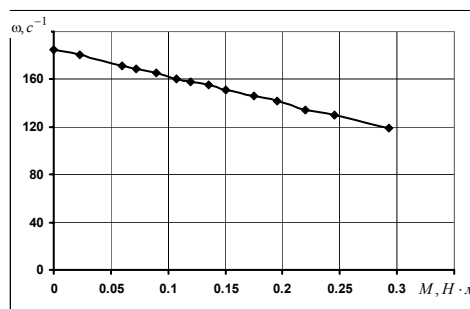


Рис. 11

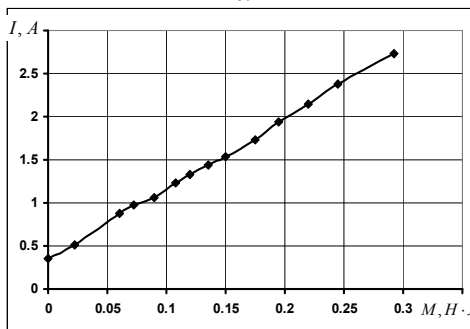


Рис. 12

Характеристики снимались при напряжении источника питания $U_d = 24$ В и без регулирования скорости.

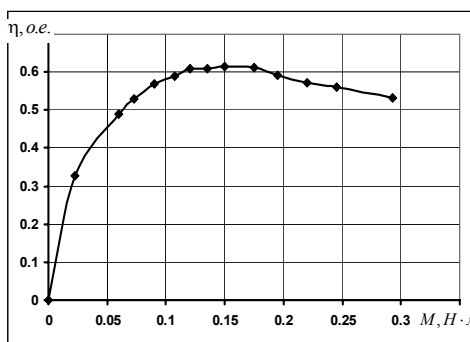


Рис. 13

По результатам испытаний установлены номинальные значения скорости $\omega_{НОМ} = 140$ с⁻¹, тока электропривода $I = 2$ А. При этом $\eta_{НОМ} = 0,58$, а при нагрузке, равной 0,75 от номинальной, $\eta = 0,615$.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют об успешной реализации сформулированной в данной статье научно-практической задачи.

Итоговым выводом по представленным материалам может служить следующее: использование уже имеющихся штампов статора, разработанных для ВРД, позволяет, при выполнении скоса зубцовой зоны, производить ВДПМ с хорошими рабочими свойствами и, тем самым, расширить номенклатуру выпускаемых бесконтактных электроприводов на заводе "Электротехника" при относительно невысоких дополнительных капиталовложениях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Антонов А.Е., Радимов И.Н., Рымша В.В. Сопоставительный анализ вентильных двигателей с пассивным и активным ротором // Праці ІЕД НАН України. Електродинаміка: 36. наук. пр. – 2005. № 1(10). – С. 53-56.

Поступила 30.08.2007

ОСОБЕННОСТИ НАЗНАЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Ставинский А.А., д.т.н., проф.

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова

Украина, 54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9, кафедра "Судовые электроэнергетические системы"
тел. (0512) 39-94-53, E-mail:ph@udmtu.dip.mk.ua

Виконано аналіз специфіки, наведено результати розробок, сформульовано визначення і на прикладі поршневих механізмів показані переваги використання спеціальних електричних машин.

Выполнен анализ специфики, приведены результаты разработок, сформулировано определение и на примере поршневых механизмов показаны преимущества использования специальных электрических машин.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении XX века объекты практической электромеханики развивались традиционными способами использования достижений электроматериаловедения, прикладной математики и вычислительной техники в рамках единых общепромышленных серий электрических машин (ЭМ) и трансформаторов. Принципиальные "классическая" структура и технология изготовления указанных устройств сохранялись в течение многих десятилетий неизменными, а размеры и удельная материалоемкость снижались. Однако существует мнение, что развитие наиболее массовых продуктов электротехнической промышленности – асинхронных двигателей (АД) и трансформаторов традиционными способами приостановлено и их дальнейшее совершенствование можно осуществить на основе "интеллектуальных" [1] или "нетрадиционных" [2, 3] конструкций и технологий. Во второй половине прошлого века важными факторами прогресса в электромеханике явились усовершенствование энергетических установок транспортных средств, развитие электронных систем, теории и практики систем автоматики, авиации и космонавтики. Это стало причиной появления новых направлений усовершенствования на основе системного подхода – интеграции ЭМ с электронно-полупроводниковыми устройствами или элементами конструкций приводимых в движение механизмов, а также на основе поиска нетрадиционных решений и специальных исполнений электромеханических и электромагнитных преобразователей [1-4] которые получили название специальных.

Современное состояние развития электромеханических устройств и систем характеризуется повышением значимости специальных ЭМ и тенденцией создания их специализированных исполнений и серий [5, 6]. В связи с этим, возникает необходимость в анализе специфики назначения и понятия "специальные ЭМ".

В государственных стандартах Украины ДСТУ 2286-93 и ДСТУ 3270-95 определение "электрична машина спеціального призначення" характеризуется спецификой назначения, применения или спецификой характеристик и конструкции, а определение "спеціальний трансформатор" привязано к особенностям сети и потребителя и не учитывает нетрадиционные свойства и особенности конструкции.

Несмотря на наличие учебных пособий по специальным ЭМ, например [7], к настоящему времени не сформулировано соответствующее обобщенное понятие. К специальной ЭМ также можно отнести и статиче-

ское индукционное устройство – специальный трансформатор, как преобразователь энергии с подвижным видом материи – магнитным полем, а также ускоритель элементарных частиц и термоядерный реактор с удержанием плазмы, являющиеся, согласно [7], особой разновидностью трансформатора. Необходимость подобной формулировки и анализа обусловлена наличием в образовательной программе бакалаврата "Электромеханика" одноименной учебной дисциплины.

Целью работы является обобщение особенностей и вопросов специфики применения, а также формулировка общего определения понятия "Специальные электрические машины".

КЛАССИФИКАЦИЯ И СПЕЦИФИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Специальные ЭМ (с подвижными элементами и статические) соответствуют общим классификациям по роду тока, принципу действия, назначению, мощности и частоте вращения, а дальнейшее расширение их структурного и видового состава определяется общей системной классификацией [8]. Однако от подвижных и статических ЭМ общепромышленного и силового назначений они отличаются конструктивными (обращенные, встроенные, герметичные, высокоскоростные...), технологическими (безотходные, интегральные...), функциональными (повышенная конструктивная приспособляемость к конкретным видам механизмов, управляемость, быстроедействие...) и технико-физическими (маломощного исполнения, с пониженным пусковым током, повышенной термостойкостью...) свойствами, а также отраслевым использованием. Вариант классификации основных разновидностей специальных ЭМ (как изделий используемых в определенных отраслях промышленности) приведен на рис. 1.

Каждый из обозначенных на рис.1 видов может быть представлен отдельной отраслевой классификацией. Например, к военно-промышленному назначению относятся ЭМ систем движения, вооружения, наведения, обнаружения, ориентации, навигации, жизнеобеспечения...

Другим примером комплекса специальных ЭМ являются судовые генераторы, двигатели, силовые, измерительные и преобразовательные трансформаторы электростанций и гребных электрических установок, двигатели палубных якорно-швартовых и подъемно-транспортных механизмов, двигатели оборудования вентиляции и кондиционирования воздуха...



Рис. 1. Диаграмма классификации основных разновидностей специальных электромашин по отраслевому научно-технологическому использованию

Из разновидностей специальных ЭМ, отличающихся функциональной однородностью или спецификой назначения, можно составить отдельные классификации, например машин и микромашин электромеханических систем автоматизации, электромехатронных преобразователей, а также микромашин электромеханических систем приборов и вычислительных устройств.

Специальные генераторы, двигатели и трансформаторы, являющиеся габаритными и металлоемкими устройствами, оказывают существенное влияние на массогабаритные и эксплуатационные показатели транспортных и других специальных механизмов, систем и устройств в целом. К активной части (АЧ) и конструкционным элементам специальных ЭМ предъявляются требования повышенной надежности, минимальных массогабаритных показателей, а также иногда и специальные требования, например электромагнитной совместимости, возможности работы при высокой влажности, повышенных температуре, давлении, наличии излучений.

В [9] отмечается, что при качке и маневрировании транспортных средств и подвижных технических систем, узлы и элементы используемых в них ЭМ воспринимают высокую нагрузку P_{Γ} от гироскопического момента M_{Γ} . Эта нагрузка зависит от угловых частот Ω и ω_{Π} соответственно вращения ротора и перемещения системы в пространстве, а также момента инерции J_R и расстояния $l_{\text{ВП}}$ между подшипниками вала ротора (рис. 2).

$$P_{\Gamma} = M_{\Gamma} / l_{\text{ВП}} = \Omega \omega_{\Pi} J_R / l_{\text{ВП}}, \quad (1)$$

где величина J_R определяется радиусами инерции r_i и массами m_i активных и конструкционных элементов общим количеством k ,

$$J_R = \sum_{i=1}^{i=k} m_i r_i^2. \quad (2)$$

Кроме дополнительной нагрузки (1) ротор, подшипниковые узлы и транспортные ЭМ в целом, должны в течение заданного ресурса и срока службы выдерживать удары, вибрации и другие действия случайного и периодического характера.

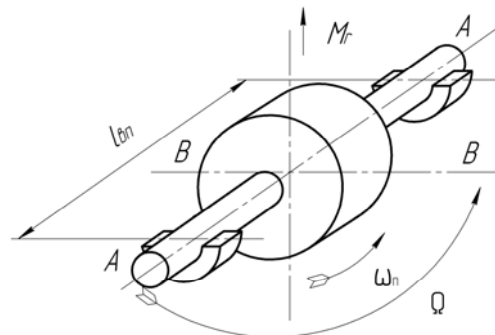


Рис. 2. Действие гироскопического момента

К некоторым АД предъявляются требования улучшенных пусковых характеристик, в частности низкой кратности пускового тока (двигатель судового подруливающего устройства), а некоторые двигатели, генераторы и трансформаторы (например, надводных и подводных кораблей) должны удовлетворять особым требованиям по виброакустическим характеристикам (ВАХ), определенным минимумам внешних магнитных полей и массогабаритных показателей.

Особенностью, отличающей аксиальные (торцевые) и обращенные ЭМ, является повышенный J_R (2) и как следствие, повышенные длительность переходных процессов и P_{Γ} (1) в приводе транспортных механизмов. В связи с этим, была выполнена разработка торцевых АД [10] и обращенных АД [11] морского назначения, отличающихся пониженным моментом инерции ротора и повышенными технико-экономическими показателями. Улучшение показателей таких АД относительно известных аналогов достигнуто на основе нетрадиционной пространственной структуры элементов АЧ с конусно-цилиндрическим (рис. 3) и конусно-плоскостным (рис. 4) магнитопроводами ротора.

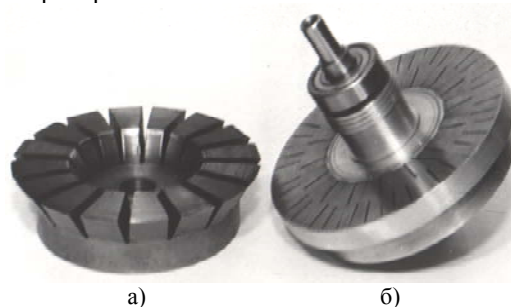


Рис. 3. Магнитопровод ротора (а) и короткозамкнутый ротор (б) торцевого двухполюсного двигателя мощностью 1,5 кВт (380 В, 50 Гц)

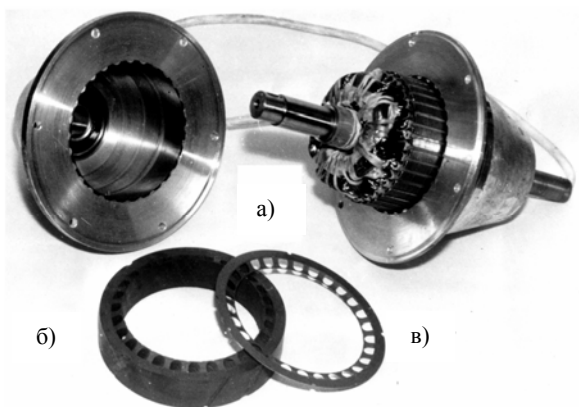


Рис. 4. Обращенный шестиполюсный двигатель со снятым полуротором (а) мощностью 0,25 кВт (380 В, 50 Гц), пакет (б) и пластина (в) магнитопровода полуротора

Одним из важных современных санитарных, технических и специальных требований, предъявляемых к электрооборудованию, является электромагнитная совместимость, в частности, уровень внешнего магнитного поля. Особенностью аксиальных структур вращающихся "торцевых" и симметричных пространственных статических ЭМ является теоретический минимум (ноль) результирующего "магнитного момента" [12].

Поэтому разработку, например трехфазного трансформатора, удовлетворяющего условиям максимальной компактности и минимума внешнего магнитного поля, можно обеспечить использованием аксиальных пространственных симметричных магнитопроводов с одноплоскостными технологическими стыками и параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (рис. 5) [13].



Рис. 5. Трехфазный компактный трансформатор с симметричным пространственным магнитопроводом мощностью 6,3 кВ·А (660/220/18 В, 50 Гц)

Поверхности роторов некоторых специальных АД иногда непосредственно соприкасаются с рабочим органом механизма или производственным сырьём. Поэтому АД машин, работающих в агрессивной среде, должна быть защищена (герметизирована).

В связи с указанной спецификой, возможно единичное или совместное действие факторов значительных внешних динамических, электромагнитных, тепловых и механических нагрузок. Каждый из обозначенных факторов может явиться причиной преждевременного износа активных и конструктивных элементов и требует учёта при проектировании.

Другой спецификой специальных ЭМ является обеспечение функционирования наиболее сложных

автоматизированных электромеханических систем, например двух и трёхкоординатного перемещения. В таких системах применяются так называемые двух-, трёх и шестистепенные ЭМ. Двухстепенные ЭМ используются в приводах с продольно-поперечным движением и вращательно-поступательным перемещением [14, 15]. Трёх и шестистепенные ЭМ используются в приводе гироскопов космических аппаратов и содержат систему электромагнитного подвеса сферического ротора во внутренней полости сферического статора [16].

Наличие и необходимость учёта отмеченных специфических факторов и требований обуславливает повышенную сложность исследований и разработок специальных ЭМ относительно электромеханических устройств традиционных конструкций.

ДВЕ ГРУППЫ И ВОПРОС РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Разновидности специальных ЭМ (рис. 1) также можно разделить на две группы.

К первой группе относятся машины, которые по внешнему виду, конструкции и технологии изготовления существенно не отличаются от общепромышленных вращающихся "классических" ЭМ (КЭМ). Однако им присущи дополнительные специальные или улучшенные определенные стандартные показатели. Примером таких ЭМ являются машины общесудового назначения которые, в соответствии с фактором (1), отличаются повышенной прочностью конструктивных элементов, а также имеют улучшенные ВАХ и пониженные пусковые токи.

Ко второй группе относятся машины, отличающиеся от КЭМ одной или несколькими конструктивно-функциональными особенностями: типом движения, формой активных поверхностей (рабочего зазора), технологией изготовления и специфическими возможностями. Эти особенности влияют на преимущество и целесообразность применения машин второй группы и должны быть тщательно проанализированы в каждом конкретном случае.

Например, при определении необходимости разработки и использования аксиальных АД [9, 10] или АД с конусными активными поверхностями [17], необходимо учитывать возможное усложнение технологии изготовления магнитопроводов и неравномерность распределения магнитного поля в активном объёме.

Аналогично, при решении задачи замены системы КЭМ - кинематическая передача преобразования вращательного движения в поступательное перемещение на линейную ЭМ, необходимо учесть энергетический фактор. Известно, что коэффициент полезного действия и мощность линейной или линейно-колебательной машины существенно уступают аналогичным величинам КЭМ [18].

Исходя из изложенного, специальные ЭМ второй группы обеспечивают электромагнитное и электромеханическое преобразование энергии в объектах двух типов. К первому типу относятся объекты, в которых применение специальных ЭМ является единственно конструктивно или технологически возможным решением. Ко второму типу относятся объекты, технический уровень которых может быть существенно повышен на основе специальных ЭМ.

ПРИМЕР ВАРИАНТОВ ВОЗМОЖНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАШИН ВТОРОЙ ГРУППЫ

Особенности и перспективы применения специальных ЭМ второй группы показаны на примерах возможного усовершенствования плунжерных механизмов.

Наиболее распространенным в приводе насосов и герметичных компрессоров является встроенный двухполосный АД вращательного движения, обеспечивающий снижение массы, габаритов и полную герметичность механизма. В герметичных холодильных компрессорах [19] роторы АД традиционной конструкции устанавливаются на консоли вертикального вала (рис. 6, а). Высокие требования по жесткости вала обуславливают увеличенный внутренний диаметр магнитопровода ротора (наружный диаметр консоли).

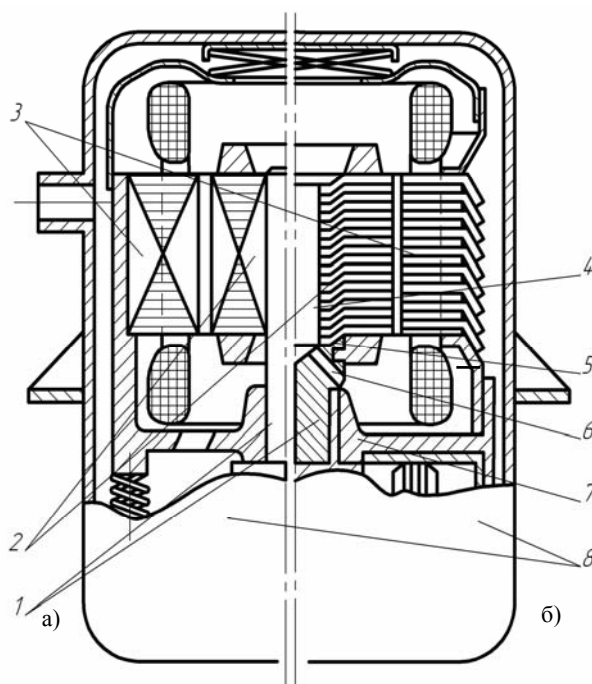
Встроенный АД охлаждается всасываемыми парами хладагента и температура участков обмотки, удаленных по ходу движения паров, повышается. Поэтому нагрев нижних лобовых частей обмотки статора на несколько градусов выше ее средней температуры. Хладагент проходит через кольцевой канал, являющийся рабочим зазором между статором и ротором. Малое сечение указанного канала создает большое аэродинамическое сопротивление на всасывании и способствует снижению холодопроизводительности компрессора. Выполнение в ярме ротора дополнительных отверстий-каналов совместно с внутренним отверстием под жесткий вал приводит к завышению диаметров активных поверхностей и снижению показателей двухполосного АД.

Отмеченные недостатки устраняются использованием ротора с осевым каналом и пространственным конусно-плоскостным магнитопроводом [4], а также с хвостовиком, соединенным с укороченным валом компрессора (рис. 6, б). Хвостовик содержит конусную поверхность контакта с торцом ярма и выступы, охваченные алюминием короткозамыкающих колец ротора, что обеспечивает надежное соединение и передачу вращающего момента. Хвостовик в зоне короткозамыкающего кольца также содержит отверстия, связанные с центральным каналом магнитопровода ротора [20].

В конструкции (рис. 6, б) ребра между нагнетательными отверстиями хвостовика способствуют прокачиванию хладагента через центральный канал ротора с меньшей (относительно зазора) поверхностью теплоотдачи и обеспечивают обдув нижних лобовых частей статора. В результате интенсифицируется теплоотвод с обмотки статора и снижается аэродинамическое сопротивление на всасывании.

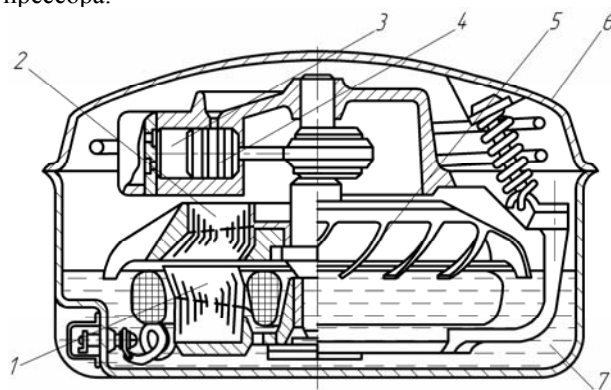
Термическое сопротивление тепловым потокам от статора в компрессоре (рис. 6, а), как и в КЭМ (статор-корпус), состоит из сопротивления ярма, стыкового зазора и "юбки" блок-картера. В схеме на рис. 6, б показан статор с пространственным многоплоскостным магнитопроводом [3, 4], отличающийся повышенной площадью и "шероховатостью" наружной охлаждаемой поверхности относительно статора (рис. 6, а). Отказ от "юбки", развитая площадь и шероховатость наружной поверхности ярма обеспечивают дополнительную интенсификацию теплоотвода от статора.

Представленные конструктивные решения (рис. 6, б) повышают надежность и холодопроизводительность, а также снижают материалоемкость компрессора относительно аналога (рис. 6, а).



1 – вал; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – осевой канал; 5 – хвостовик; 6 – нагнетательное отверстие; 7 – блок-картер; 8 – кожух

Другой вариант усовершенствования герметичного компрессора возможен использованием встроенного торцевого АД с нижним расположением статора в блок-картере (рис. 7). Магнитопровод статора с лобовыми частями обмотки погружен в масло. Наружное короткозамыкающее кольцо ротора содержит лопатки. При вращении указанные лопатки захватывают масло и разбрасывают его в полости кожуха. Попадая на блок цилиндров, ротор и другие элементы, брызги масла интенсифицируют теплоотвод и охлаждение компрессора. Подобное решение также способствует дегазации, повышению диэлектрических свойств масла и шумоглушению компрессора [19, 21]. Без дополнительных вспенивающих, разбрызгивающих и охлаждающих устройств достигается эффективное охлаждение и снижение размеров и материалоемкости компрессора.



1 – статор; 2 – ротор; 3 – цилиндр; 4 – поршень; 5 – лопатки; 6 – кожух; 7 – масляная ванна

Заманчива разработка поршневого электрокомпрессора (насоса) без кривошипно-шатунного механизма. Такая разработка затруднена проблемой инерционности и низкочастотных собственных колебаний системы якорь-шток-поршень, а также необходимостью аккумуляирования кинетической энергии в упругих элементах. Однако реализация указанной системы может быть оправдана, например, в скважинных насосах, так как исключает колонны вращающихся трубопроводов.

На рис. 8 изображена схема электронасоса [19, 22] габаритные размеры которого соответствуют размерам линейного виброэлектродвигателя с якорем-плунжером пониженной инерционности. Минимальные размеры и масса насоса могут быть обеспечены оппозитным расположением неподвижных поршней и выполнением цилиндров в якоре в виде двух симметричных осевых полостей.

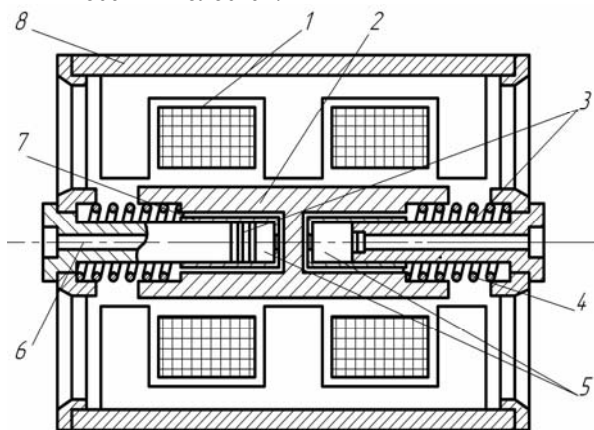


Рис. 8. Схема компрессора с линейным виброэлектродвигателем:

1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – поршень; 4 – упругий элемент; 5 – цилиндр; 6 – нагнетательный канал; 7 – всасывающий канал; 8 – корпус

Электродвигатель в насосе (рис. 8) охлаждается прокачиваемым газом (жидкостью), так как всасывающие каналы и клапаны расположены в якоре и его средней торцевой стенке между цилиндрами, а нагнетательные каналы и клапаны размещены в поршнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе приведенных положений, разработок и предложений можно сформулировать следующее определение.

К специальным ЭМ относятся электромеханические и индукционные статические преобразователи энергии, которые отличаются конструктивным, параметрическим или определённым эксплуатационным исполнением от общепромышленных машин единых серий и предназначены для генерирования и преобразования электроэнергии, а также создания электрических сигналов и импульсов в системах, механизмах и особых условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Volkrodt W. Neue Wege im Electromaschin- enbau // *Electro-Vobr.* –1985. –S. 29-38.
 [2] Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых двигателей // *Электричество.* – 1996. – №8. – С. 37-42.
 [3] Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики// *Электротехніка і електромеханіка.* – 2004. – №1. – С. 57-61.

[4] Ставинский А.А. Проблема и нетрадиционные технические решения улучшения виброакустических характеристик асинхронных двигателей. // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2004. – №4. – С. 80-85.
 [5] Данько В.Г. Перспективні розробки турбо-генераторів з надпровідниковими обмотками // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2004. – №4. – С. 17-20.
 [6] Петрушин В.С. Современное состояние и перспективы производства регулируемых асинхронных двигателей // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2005. – №4. – С. 25-29.
 [7] Специальные электрические машины: (Источники и преобразователи энергии). Учебное пособие для вузов./ А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин и др.; Под ред. А.И. Бертинова. – М.: Энергоиздат, 1982. – 552 с.
 [8] Шинкаренко В.Ф. Основы теорії еволюції електромеханічних систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
 [9] Игнатов В.А., Ставинский А.А. Зависимости технико-экономических показателей торцевых асинхронных двигателей от соотношения диаметров активных частей // *Электричество.* –1984. – №6. – С. 28-34.
 [10] Ставинский А.А. Усовершенствование конструкции короткозамкнутого ротора торцевого асинхронного двигателя для привода транспортных механизмов//Сб. научн. тр. – Киев: Институт электродинамики АН УССР. –1988. – С. 96-103.
 [11] Ставинский А.А. Асинхронный двигатель с двухпакетным внешним ротором для привода судового встраиваемого вентилятора//*Электротехн. пр-во. Передовой опыт и науч.-техн. достижения для внедрения: Отрасл. информ. сб.* –1990. – Вип.6(30). – С. 4-7.
 [12] Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. – Киев: 1995. – 42 с. – (Препр. /НАН Украины. Ин-т Электродинамики, № 772).
 [13] Ставинский А.А., Забора И.Г. Усовершенствование оборудования водолазных комплексов на основе специальных исполнений электромеханических устройств // *Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю.* – Миколаїв: НУК, 2006. – С. 186-194.
 [14] Антонов А.Е. Двухкоординатные электрические машины для следящих систем. – К.: ИЭД НАНУ, 2000. – 191 с.
 [15] Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода. – М.: Энергоатомиздат., 1988. – 208 с.
 [16] Милых А.Н., Барабанов В.А., Двойных Е.В. Трехступенные электрические машины. – К.: Наукова думка, 1979. – 312 с.
 [17] Гусельников Е.М., Цукерман Б.С. Само-тормозящиеся электродвигатели. – М.: Энергия, 1971. – 96 с.
 [18] Ижеля Г.И., Ребров С.А., Шаповаленко А.Г. Линейные асинхронные двигатели. – К.: Техніка, 1975. – 136 с.
 [19] Гидулян В.И., Ставинский А.А. Тенденции в развитии герметичных высокотемпературных компрессоров // *Холодильная техника.* –1987. – №6. – С. 28-32.
 [20] Короткозамкнутый ротор: Декларационный патент 29655 Украина, МКВ НО2К1/28 / А.А. Ставинский (Украина). – Оpubл. 30.06.98, Бюл. №3. – 2 с.
 [21] Герметичный холодильный компрессор: А.с.920258 СССР, МКИ F04В 39/06, F25В 31/02/ А.А. Ставинский, В.И. Гидулян (СССР). – Оpubл. 25.04.82, Бюл. №14. – 2 с.
 [22] Электромагнитный компрессор двойного действия: А.с.754107 СССР, МКИ F04В 35/04 / А.А. Ставинский (СССР). – Оpubл. 07.08.80, Бюл. №29. – 2 с.

Поступила 8.08.2007

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В УСЛОВИЯХ ИХ РАБОТЫ В КОММУТАЦИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ АППАРАТАХ

Сосков А.Г., д.т.н., Рак Н.О.

Харьковская национальная академия городского хозяйства

Украина, 61002, Харьков, ул. Революции, 12, ХНАГХ, кафедра электротехники

тел.(057) 707-31-11

Соскова И.А., к.т.н.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Украина, 61003, Харьков, ул. Университетская, 16, УИПА, кафедра теоретической и общей электротехники

тел. (057) 733-79-73

На основі аналізу методів розрахунку температури напівпровідникової структури силових напівпровідникових приладів в умовах їх роботи в комутаційних апаратах була запропонована інженерна методика розрахунку цієї температури при дії на них короткочасних імпульсів потужності довільної форми.

На основе анализа методов расчёта температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов в условиях их работы в коммутационных аппаратах предложена инженерная методика расчёта этой температуры при воздействии на них кратковременных импульсов мощности произвольной формы.

ВВЕДЕНИЕ

В коммутационных полупроводниковых аппаратах (ПА) как гибридных, так и бесконтактных силовые полупроводниковые приборы (СПП) входят в состав полупроводниковых ключей (ПК), обеспечивающих бездуговую коммутацию потоков электрической мощности, т.е. выполняющих основную силовую функцию коммутационного аппарата. В качестве СПП в указанных ключах используются одноперационные приборы (тиристоры, симисторы, оптронные тиристоры) либо двухоперационные приборы (IGBT-транзисторы, ГТО-тиристоры, IGCT-тиристоры).

Важнейшим фактором, определяющим надёжность этого основного узла коммутационного ПА, является тепловой режим входящих в их состав СПП [1, 2]. Основным параметром, характеризующим этот режим, является температура полупроводниковой структуры СПП, зависящая от характера подводимой мощности и его конструкции. Поэтому расчёт значений этой температуры при заданных условиях работы является одной из важнейших задач, возникающих при разработке и проектировании коммутационных ПА. Расчёт теплового режима СПП, используемого в ПА, заметно усложняется вследствие специфической формы импульсов рассеиваемой в полупроводниковой структуре мощности и нестационарного характера протекающих в СПП теплофизических процессов [1, 2, 3].

В [1] показано, что основным режимом работающих в составе ПА СПП является импульсный режим. В этом режиме они работают в гибридных ПК переменного тока, в гибридных и бесконтактных ПК постоянного тока, особенно, когда эти приборы используются в схемах принудительной ёмкостной коммутации, также в бесконтактных ПК переменного и постоянного тока при аварийных режимах в цепи нагрузки. При этом форма токового импульса может быть произвольной при длительности до 0,02 с., т.е. данный режим СПП широко распространён в ПА и

требует детального анализа. К тому же следует отметить, что расчёт температуры полупроводниковой структуры СПП, работающих в составе ПА в длительном режиме, рассмотрен авторами в [4].

Целью данной работы является разработка инженерной методики расчёта температуры полупроводниковой структуры (в дальнейшем просто структуры) СПП при воздействии на них токовых импульсов произвольной формы и длительностью не более 0,02 с. Эта цель реализуется путём анализа аналитических методов расчёта температуры структуры СПП, выполненных на базе упрощённых тепловых моделей этих приборов.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА СПП

Существует два основных метода определения температуры структуры СПП: графо-аналитический и аналитический [1]. В настоящее время для расчёта температуры СПП в импульсном режиме наибольшее распространение получил первый метод, который основан на использовании графической зависимости переходного теплового сопротивления от времени [2]. В [2] рассмотрены особенности, свойственные этому методу, а также основные правила его применения. Однако, как показано в [1], применение этого метода для расчёта температуры структуры СПП при воздействии на них импульсов токов, возникающих в условиях их работы в составе ПА, затруднено из-за отсутствия достаточных исходных данных и из-за сложности формы импульса мощности, особенно в гибридных ПА [1].

Аналитический метод расчёта тепловых характеристик (температуры полупроводниковой структуры) СПП основан на численном решении уравнений нестационарной теплопроводности, составленных для внутренних элементов конструкции с учётом их взаимосвязи, геометрических размеров и характеристик применяемых материалов. В общем случае нестациона-

нарные тепловые процессы многослойных систем, таких как, например, вышеупомянутые СПП, описываются системой нелинейных уравнений в частных производных с неоднородными граничными и начальными условиями. Поскольку аналитически такие системы уравнений, как правило, непосредственно неразрешимы, решение их выполняется с помощью ЭВМ численно.

Изучение конструкции СПП показывает, что в первом, самом общем приближении теплофизическая модель этого прибора может быть представлена в виде многослойной системы разнородных пластин с внутренним источником тепла, расположенном в полупроводниковой структуре. Основным элементом этой модели является монокристаллическая пластина полупроводника (как правило, кремния), на которой методом диффузии образовано несколько электронно-дырочных переходов, образующих полупроводниковую структуру. Эта пластина совместно с термокомпенсаторами называется выпрямительным элементом, по конструкции которого современные СПП делятся на две группы: приборы с припаянными контактами (например, мощные тиристоры с гибким или жёстким выводом) и приборы с прижимными контактами (например, мощные таблеточные тиристоры). В первой группе приборов контакт между полупроводниковой пластиной и вольфрамовым термокомпенсатором обеспечивается методом пайки (рис. 1, а), во второй припаяется только нижний термокомпенсатор, контакт же между пластиной и верхним медным основанием создаётся с помощью постоянного механического нажатия (рис. 1, б), обеспечиваемого конструкцией прибора через мягкую токопроводящую прокладку.

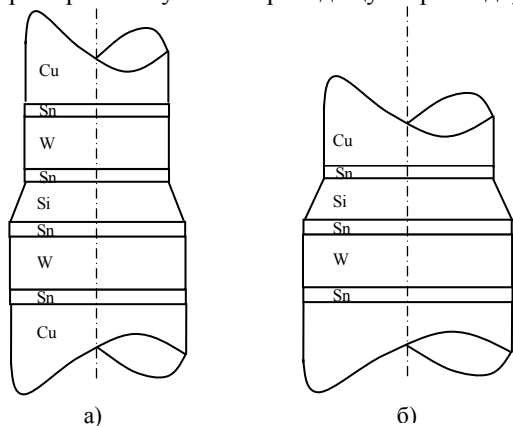


Рис. 1. Варианты конструкции мощных тиристоров: а) с припаянными контактами, б) с прижимными контактами

В связи с этим приборы с прижимными контактами являются более устойчивыми к воздействию температурных циклов и у них лучше условия отвода тепла от полупроводниковой пластины, поэтому СПП на токи свыше 250 А выполняются только в таблеточном исполнении.

Однако при рассматриваемых малых длительностях токовых импульсов реально предположить, что тепло за время импульса не успевает распространиться достаточно далеко от своего источника (полупроводниковой структуры) [1]. Действительно, в [1] показано, что при анализе температурного режима СПП,

работающих в условиях воздействия кратковременной (до 0,02 с) токовой нагрузки, достаточно будет ограничиться только рассмотрением токовой модели, состоящей в основном из выпрямительного элемента [1], что существенно упрощает решение задачи.

На рис. 2 представлена упрощённая тепловая модель СПП (тиристора) с припаянными контактами, в которой учёт слоёв припоя был произведён за счёт расширения слоёв вольфрама на толщину, которая по тепловому сопротивлению была эквивалентна слоям припоя [5].

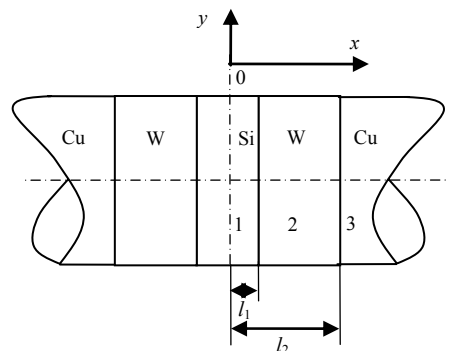


Рис. 2. Тепловая модель СПП (тиристора)

Расчёт уравнений теплопроводности в предложенной модели проводится при следующих допущениях [1]: отвод тепла от боковой поверхности при малом времени нагрева ($t_H \leq 0,02$ с) отсутствует; распространение тепла в модели симметрично; все элементы конструкции (слои кремния, вольфрама и меди) имеют одинаковый диаметр, равный диаметру кремниевой пластины в её узкой части; слой меди представлен в виде полуограниченного тела; вся энергия выделяется равномерно по объёму слоя кремния; теплофизические параметры материалов не зависят от температуры; вольтамперная характеристика в прямом направлении аппроксимируется пороговым напряжением U_0 и линейной зависимостью от тока при $u > U_0$, определяемой дифференциальным сопротивлением R_d . Правомерность таких допущений показана в [1].

Решение уравнения теплопроводности для этой модели приведено в [5]. При этом превышение температуры в центре кремниевой пластины – самой нагретой части прибора, имеет следующий вид:

$$\theta_m(t) = K \int_0^t P_T(t-\tau) \cdot f_{2m}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

$$\text{где } K = \frac{2b_1 \cdot b_2}{\pi v_1 c_1 \gamma_1} = \frac{2\lambda_1 \sqrt{a_3}}{\sqrt{a_1} \cdot \lambda_3 \pi v_1 \gamma_1}; \quad b_1 = \frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}};$$

$$b_2 = \frac{\sqrt{a_3}}{\lambda_3};$$

v – объём кремниевой пластины; λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоёмкость; γ – удельная плотность; $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коэффициент температуропроводности; $P_T(t) = i_T(t)[U_0 + i_T(t)R_d]$ – мгновенная тепловая мощность;

венная мощность; $i_T(t)$ – ток в импульсе; $0 < t \leq t_{И}$, $t_{И}$ – длительность импульса тока;

$$f_{2m}(\tau) = \int_0^{\infty} \frac{\sin p_1 u \cdot e^{-u^2 \tau}}{u(A_0^2 + B_0^2)} du, \quad (2)$$

где u – действительная переменная;

$$p_1 = \frac{l_1}{\sqrt{a_1}}; \quad p_2 = \frac{l_2 - l_1}{\sqrt{a_2}};$$

$$A_0 = \cos p_1 u \cdot \cos p_2 u - b_1 \sin p_1 u \cdot \sin p_2 u;$$

$$B_0 = b_1 b_2 \sin p_1 u \cdot \cos p_2 u + b_2 \sin p_2 u \cdot \cos p_1 u.$$

Из выражения (1) следует, что переходное тепловое сопротивление тиристора с припаянными контактами будет иметь следующий вид:

$$r_1(t) = K \int_0^t f_{2m}(t) dt,$$

где $0 < t \leq t_{И}$, $t_{И} \leq 0,02$ с.

На рис. 3 представлена упрощённая тепловая модель СПП (тиристора) таблеточного типа с прижимными контактами [6]. В ней кремниевая пластина полупроводниковой структуры прибора находится в тесном тепловом контакте справа с вольфрамовым термокомпенсатором, а слева с медным основанием прибора. Причём слои меди и вольфрама представлены в виде полуограниченных тел. Правомерность такой замены для малых отрезков времени (порядка 0,02 с) показана в [1, 6]. Кроме того, в модели не учтён тонкий слой припоя (порядка 0,1 мм) между кремниевой пластиной и вольфрамовым термокомпенсатором, и тонкая прокладка (до 0,2 мм) на основе олова между кремнием и медью.

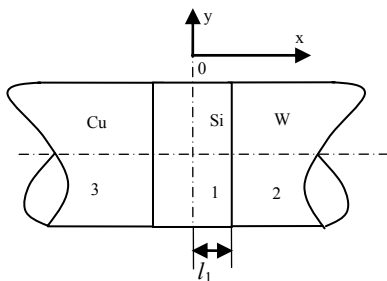


Рис. 3. Расчётная тепловая модель СПП (тиристора) с прижимными контактами

Эти слои компенсируются соответствующим увеличением толщины кремния, которая по тепловому сопротивлению равна слоям припоя и прокладки, что также допустимо при малых толщинах слоёв контактного материала [1].

Решение уравнений теплопроводности для этой модели выполняется при тех же допущениях, что и в предыдущем случае. В результате выполненных преобразований, представленных в [6], выражение для определения максимальной температуры структуры выглядит следующим образом:

$$\theta_m(t) = \frac{1}{S} \int_0^t \alpha(t-\tau) \cdot P_T(t-\tau) \cdot f_{пр}(\tau), \quad (3)$$

где $0 < t \leq t_{И}$; S – сечение кремниевой пластины в

узкой части; $\alpha(t) = 4761,5t^3 + 153,7t^2 - 9,4t + 0,5$ – коэффициент, учитывающий несимметричность распределения потока мощности в модели;

$$f_{пр}(\tau) = \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &(-1)^{n-1} \cdot k_{пр}^{n-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \cdot e^{-\frac{2(n-1) \cdot l_1 / \sqrt{a_1}}{4\tau}} \\ &- (-1)^{n-1} \cdot k_{пр}^n \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \cdot e^{-\frac{2n \cdot l_1 / \sqrt{a_1}}{4\tau}} \end{aligned} \right\},$$

$$k_{пр} = \frac{b_{пр} - 1}{b + 1}; \quad b_{пр} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}.$$

Аналогично предыдущему случаю выражение для переходного теплового сопротивления для этой модели будет иметь следующий вид:

$$r_2(t) = \frac{1}{S'} \int_0^t f_{пр}(t) dt, \quad (4)$$

где $0 < t \leq t_{И}$, $t_{И} \leq 0,02$ с.

Таким образом, расчет температуры структуры мощных СПП различных типов их конструкций можно выполнять в среде Mathcad с помощью выражений (1) и (3).

Однако в связи с тем, что при этих расчётах необходимо вводить информацию, характеризующую конструкцию конкретного типа СПП, которой, не располагают разработчики коммутационных ПА, авторы предлагают усовершенствованную методику расчёта указанной температуры, лишённую перечисленных недостатков. Суть её состоит в следующем:

1) сложные выражения для переходного теплового сопротивления (2) и (4) представляются для конкретного типа СПП в виде ряда экспонент типа [2]:

$$r(t) = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}). \quad (5)$$

Такую операцию достаточно несложно выполнить с помощью программы Mathcad. При этом проведенные исследования показали, что уже при $n = 2$ погрешность аппроксимации менее 0,5%.

В табл. 1 приведены значения для R_i и τ_i , рассчитанные указанным образом, для наиболее распространённых мощных тиристорных производств ОАО "Электровыпрямитель" (Россия);

2) затем для расчёта превышения температуры структуры СПП при воздействии импульсной мощности произвольной формы $P(t)$ используется аналитическая формула Дюамеля (интеграл Дюамеля) [7].

$$\theta = \int_0^t P(t-\tau) \frac{\partial r(\tau)}{\partial \tau} d\tau + P(t)r(0), \quad (6)$$

где $P(0)$ и $r(0)$ – мощность и переходное тепловое сопротивление при $t = 0$ соответственно; $r_T(t)$ – переходное тепловое сопротивление; $P(t)$ – импульс мощности.

Таблица 1

		Параметры, характеризующие переходное тепловое сопротивление			
Тип тиристора	Конструкция контактов	$R_1, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$	$\tau_1 \cdot 10^{-3}, \text{с}$	$R_2, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$	$\tau_2 \cdot 10^{-3}, \text{с}$
T151-100	припаянные	0,01433	20,711	$4,164 \cdot 10^{-3}$	2,917
T161-160	припаянные	0,01433	20,711	$4,164 \cdot 10^{-3}$	2,917
T171-200	припаянные	0,01287	20,548	$2,077 \cdot 10^{-3}$	1,299
T171-320	припаянные	0,01287	20,548	$2,077 \cdot 10^{-3}$	1,299
T143-500	прижимные	$6,277 \cdot 10^{-3}$	17,841	$9,507 \cdot 10^{-4}$	1,120
T143-630	прижимные	$6,277 \cdot 10^{-3}$	17,841	$9,507 \cdot 10^{-4}$	1,120
T253-1000	прижимные	$6,278 \cdot 10^{-3}$	34,259	$1,177 \cdot 10^{-4}$	6,266
T253-1250	прижимные	$6,278 \cdot 10^{-3}$	34,259	$1,177 \cdot 10^{-4}$	6,266

В рассматриваемом нами случае $P(0) = 0$ и $r(0) = 0$.

Вычисления интегралов целесообразно проводить в среде Mathcad. При этом мы сможем получить значение превышения температуры не только в конце импульса тока, но и в любой момент его воздействия.

На рис. 4 приведены кривые изменения превышения температуры структуры наиболее распространенного тиристора T161-160 при воздействии на него синусоидального импульса тока амплитудой 1400 А и частотой 50 Гц. При этом кривая 1 получена на основании выражения (1), а кривая 2 – на основании выражения (6).

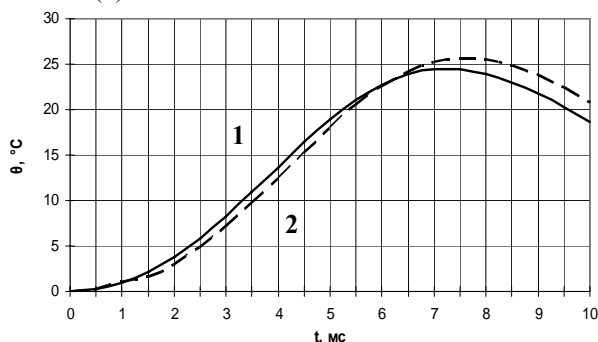


Рис. 4. Кривые изменения превышения температуры структуры тиристора T161-160: 1 - кривая, построенная на основании выражения (1), 2 – кривая, построенная на основании выражения (6)

Поскольку кривые практически совпадают, то предложенная методика расчёта позволяет получить результаты, которые с достаточной точностью для инженерных расчётов отражают нестационарные тепловые процессы, протекающие в структуре мощных полупроводниковых приборов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная авторами методика расчёта температуры структуры мощных СПП в импульсном режиме позволяет с достаточной для инженерных расчётов точностью рассчитывать нестационарный тепловой режим этих приборов при воздействии на них импульсов мощности произвольной формы и длительностью до 0,02 с. При этом для выполнения этих расчётов достаточно иметь информацию только о па-

раметрах СПП, необходимых для расчёта мощности потерь. Кроме того, использование при расчётах несложных стандартных программ делают эту методику доступной для широкого круга специалистов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита – К: Каравела, 2005 – 344 с.
- [2] Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом "Додэка – XXI", 2005 – 384 с.
- [3] Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
- [4] Сосков А.Г., Соскова И.А., Алаев П.Н., Рак Н.О. Методика расчёта теплового режима мощных управляемых полупроводниковых приборов силовых коммутационных аппаратов при длительном воздействии токовой нагрузки // Светотехника и электроэнергетика. – 2006. – №7. – С. 71-77.
- [5] Сосков А.Г., Алаев П.Н., Соскова И.А. Расчет нагрева мощных тиристорov с припаянными контактами в составе электронных ключей при воздействии импульсов тока произвольной формы // Электротехника и Электро-механика. - 2003. - №2. – С. 55 -57.
- [6] Сосков А.Г., Алаев П.Н., Соскова И.А. Расчет температурного режима силовых полупроводниковых приборов с прижимными контактами при воздействии кратковременных токовых импульсов произвольной формы // Коммунальное хозяйство городов. Научн.-техн.сб. - К.: Техника. – 2003.-Вып. 49.- С. 142-148.
- [7] Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. Учебник для вузов - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

Поступила 15.06.2007

ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА З БУФЕРОМ ЕНЕРГІЇ

Ткачук В.І., д.т.н., проф., Каша Л.В., м.н.с.

Національний університет "Львівська політехніка"

Україна, 79013, Львів, вул. С.Бандери, 12, НУ "Львівська політехніка", кафедра "Електричні машини і апарати", тел. (032) 258-21-60, E-mail: tkachuk@polynet.lviv.ua

Наведено конструктивні схеми електромеханічного перетворювача та принципову схему транзисторного комутатора вентиляльного двигуна з послідовним ємнісним накопичувачем енергії. Представлено результати дослідження величини пульсацій електромагнітного моменту цього вентиляльного двигуна та запропоновано шляхи зменшення рівня пульсацій у вентиляльних реактивних двигунах.

Приведены конструктивные схемы электромеханического преобразователя и принципиальная схема транзисторного коммутатора вентиляльного двигателя с последовательным емкостным накопителем энергии. Представлены результаты исследования величины пульсаций электромагнитного момента этого вентиляльного двигателя и предложены пути уменьшения уровня пульсаций в вентиляльных реактивных двигателях.

ВСТУП

Інтенсивні наукові дослідження в багатьох країнах світу свідчать, що вентильні реактивні двигуни (ВРД), відомі в англійській аббревіатурі, як SRM (switched reluctance motor), успішно прокладають собі шлях в застосуванні в керованих електроприводах постійного струму. Їхня проста конструкція, завдяки відсутності постійних магнітів, обмоток на роторі та щіткоколекторного вузла, а також висока ефективність забезпечує електроприводам на базі ВРД конкурентоспроможність серед інших типів приводів.

Для використання у вентильному реактивному двигуні з усього різноманіття індукторних електромеханічних перетворювачів найбільш доцільними є конструкції з явно вираженими полюсами на статорі, в яких можна забезпечити магнітну ізоляцію окремих секцій якорної обмотки. Серед них варто відзначити "класичну" конструкцію (рис. 1), з Т-подібними елементами, з С-подібними елементами та з U-подібними елементами (рис. 2) [1].

Під терміном "вентильний реактивний двигун" розумітимемо електротехнічний комплекс в складі електромеханічного перетворювача (ЕМП), давача положення ротора (ДПР), електронного комутатора (ЕК) та блоку керування (БК).

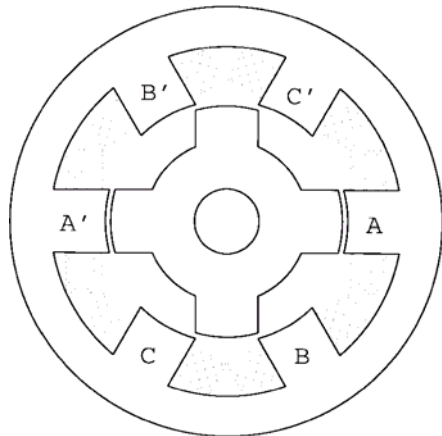


Рис. 1. Конструкція трисекційного електромеханічного перетворювача ВРД структури 6/4

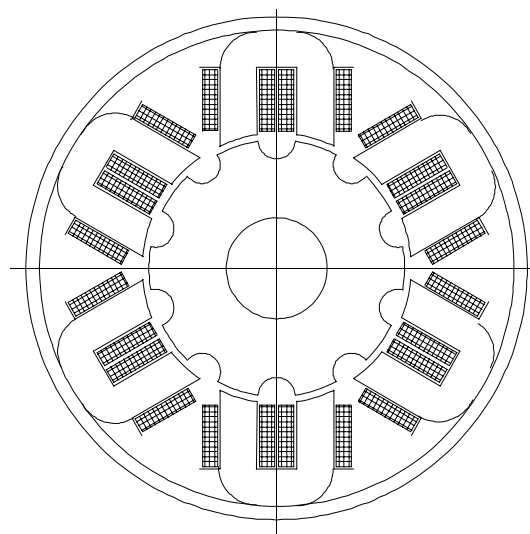


Рис. 2. U-подібна конструктивна схема активної частини ЕМП ВД

Широке розповсюдження вентильних реактивних двигунів стримується їх невисокими енергетичними показниками, що зумовлено необхідністю розсіювання запасеної в електромагнітному полі енергії під час комутації струму в секціях транзисторними ключами з метою захисту їх від перенапруг. В [2, 3] запропоновано схемні рішення транзисторних інверторів ВРД, які дозволяють повторно використовувати цю енергію для форсованого вмикання струму в секціях, захищаючи при цьому силові транзистори від перенапруг. На рис. 3 наведено, як приклад, одна із запропонованих 5-и таких схем.

На рис. 3 наведена схема транзисторного комутатора з послідовним ємнісним накопичувачем енергії (ЄНЕ). Транзистори VT11, VT21, VT31 - силові ключі ЕК, керовані сигналами ДПР, кут активної зони сигнального сектора якого більший, ніж $2 \cdot \pi / m$ і менший, ніж $4 \cdot \pi / m$ електричних радіан (m - кількість секцій обмотки якоря ВД). При закриванні, наприклад, ключа VT11 струм відповідної секції під дією електрорушійної сили самоіндукції буде протікати по

колу: діод VD12, конденсатор C11, діод VD11, заряджаючи при цьому конденсатор C11. Енергія магнітного поля передається в електричне поле конденсатора. Одночасно здійснюється захист силового ключа VT11 від перенапруги. Причому, струм секції практично миттєво переходить колою заряду конденсатора, що значно зменшує динамічні втрати на перемикання транзисторних силових ключів.

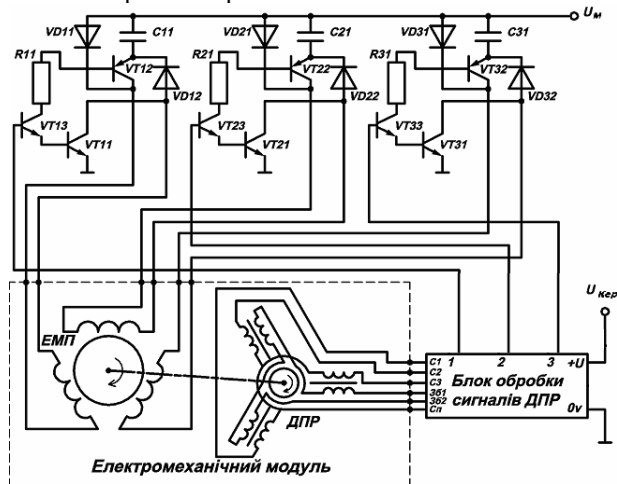


Рис. 3. Транзисторний комутатор ВД з послідовним ємнісним накопичувачем

При наступному вмиканні цієї ж секції одночасно з силовим ключем VT11 вмикається і транзистор VT12. До секції прикладаються напруга джерела живлення U_M і послідовно згідно з нею напруга конденсатора C11, в результаті чого струм у секції наростає форсовано. Діод VD11 при цьому закритий прикладеною до нього в зворотному напрямку напругою конденсатора. Конденсатор розряджається, віддаючи енергію, яка була накоплена в електричному полі, у секцію. Коли напруга на конденсаторі зменшиться до нуля, відкриється діод VD11 і секція буде отримувати живлення від джерела [2].

При обертанні ротора процес циклічно повторюється.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У вентильних реактивних двигунах з буферами енергії, крім факторів впливу на характеристики, які є і в інших типах електричних машин, присутні і характерні тільки для них. Це такі параметри й елементи як початковий кут вмикання секції, інтервал її комутації, величина ємності накопичувального конденсатора тощо. Дослідження впливу цих та інших факторів на величину пульсацій електромагнітного моменту, частоту обертання, використання активних матеріалів, енергетичні та якісні показники є актуальною задачею.

Метою даної роботи є демонстрація можливостей розроблених автоматизованих підсистем проектування і дослідження [4 - 6] як інструментів для усебічних досліджень ВРД, оптимізації проектування ЕМП та вибору необхідних елементів комутатора для забезпечення конкретного технічного завдання на проектування.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Для побудови математичної моделі досліджуваного вентильного двигуна прийнято допущення, які не надто спотворюючи реальні фізичні процеси дозволили отримати прості математичні залежності, що адекватно відображають електромеханічне перетворення в ньому енергії: інвертор сполучений з джерелом напруги, внутрішній опір якого дорівнює нулю; магнітні зв'язки між секціями відсутні; силові ключі комутатора - безінерційні електронні ключі; діоди представлено математичною моделлю; магнітна характеристика магнітопроводу магнітоізованої секції представлена аналогічним виразом; параметри обмотки статора зосереджені, втрати в сталі представлені струмами Фуко [4, 5].

Правомірність цих допущень для ВРД багаторазово доведена співставленням результатів експериментальних і математичних досліджень ВРД в діапазоні потужностей від 30 Вт і до 5 кВт.

Згідно з прийнятими допущеннями, кожен із секцій m -секційного ВД можемо в електричному відношенні розглядати окремо, а зв'язувати їх тільки через створюваний ними електромагнітний момент, який діє на ротор.

Описана математична модель послужила основою для створення автоматизованої системи дослідження керованих електроприводів на базі явнопольних вентильних реактивних двигунів з послідовними ємнісними буферами енергії [4], яка дозволяє здійснювати комплексні дослідження характеристик та поведінки ВРД в складі електромеханотронних систем за різноманітних режимів роботи.

Система містить й надає користувачу в інтерактивному режимі необхідний довідниковий матеріал, створює відповідні файли результатів розрахунку, що дозволяє використовувати відповідні програмні пакети для візуалізації графічних залежностей з метою полегшення аналізу. Система дозволяє досліджувати і регульовані властивості електроприводу, розраховуючи за цього миттєві значення всіх важливих координат.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ

Пульсації електромагнітного моменту двигуна безпосередньо впливають на стабільність його обертання. Дослідження нерівномірності обертання вентильних двигунів має важливе практичне значення у зв'язку з широким їх застосуванням в приводах, до яких виставляються жорсткі вимоги до стабільності частоти обертання. Це можуть бути пристрої з стрічкопротяжними механізмами (звукозапис й звуковідтворення, реєстратори тощо). Коливання миттєвої швидкості відбивається на якості вихідних характеристик апаратури.

На величину пульсацій електромагнітного моменту ВРД впливає багато факторів. Це, перш за все, особливість перебігу електромагнітних процесів, яка зумовлена дискретною зміною стану напівпровідникових елементів комутатора, кількість секцій якірної

обмотки, значення кута вмикання β й інтервалу комутації γ секції, співвідношення й конфігурація геометричних розмірів зубцевої зони ЕМП, спосіб керування підживлювальними ключами комутатора, величина ємності нагромаджувального конденсатора. Всі ці фактори впливають на пульсації моменту з періодом, який дорівнює міжкомутаційному періоду. Крім того, ще існують фактори, які зумовлюють так звані оборотні пульсації моменту. Це еліптичність розточки статора й ротора, технологічні похибки при виготовленні давача положення ротора, точність установки давача положення ротора тощо.

Широкий набір факторів, які впливають на величину пульсацій електромагнітного моменту ВРД, зумовлює широке коло задач дослідження.

При оцінці пульсацій електромагнітного моменту одним із найважливіших показників є максимальна нестабільність в часі, яка характеризує зміну миттєвого значення моменту досліджуваного двигуна відносно його середнього значення:

$$\Delta M = \frac{|M - M_{\text{СЕР}}|_{\text{max}}}{M_{\text{СЕР}}} \quad (1)$$

Вплив кількості секцій на нестабільність моменту. На величину пульсацій моменту ВРД найбільш впливає кількість секцій обмотки статора. В таблиці 1 наведено результати розрахунку нестабільності електромагнітного моменту й частоти обертання для вентильних реактивних двигунів з послідовними буферами енергії, які спроектовані на однакові номінальні значення основних параметрів, тільки з різною кількістю секцій.

Таблиця 1

Дослідження пульсацій моменту й частоти обертання

К-сть секцій	Z_r	γ , ел.град	ΔM	n , об/хв	$\Delta \nu$
3	10	145	0.819	700	7.2E-3
4	14	145	0.682	690	6.4E-3
5	18	145	0.206	675	0.9E-3
6	22	145	0.142	650	0.6E-3

Наведені в таблиці дані підтверджують тезу про те, що кількість секцій обмотки статора суттєво впливає на нестабільність електромагнітного моменту. Пульсації частоти обертання в значній мірі залежать від моменту інерції обертових частин двигуна й приводного механізму і тому при даних значеннях швидкості обертання є незначними.

На рис. 4 та 5 наведено графічне представлення розрахункових значень електромагнітних моментів та струмів секцій для двох крайніх значень кількості секцій - 3 і 6.

Результати досліджень стосуються вентильного двигуна, електромеханічний перетворювач якого має U-подібну конструкцію і розрахований на номінальний момент 2 Нм, частоту обертання 750 об/хв, за напруги живлення 30 В та моменту навантаження на валі 1,5 Нм. Параметри комутації: а) $\beta=10$ ел. град., $\gamma=150$ ел. град. $C=20$ мкФ; б) $\beta=0$ ел. град., $\gamma=145$ ел. град. $C=100$ мкФ; в) $\beta=0$ ел. град., $\gamma=120$ ел. град. $C=100$ мкФ.

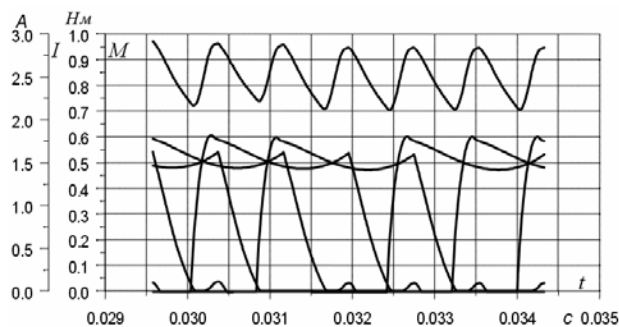


Рис. 4. Електромагнітний момент та струми 5-ти секцій 6-тисекційного ВРД з послідовним буфером енергії

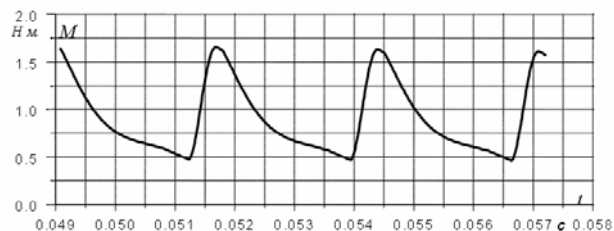


Рис. 5. Електромагнітний момент трисекційного ВРД з послідовним буфером енергії

Зі збільшенням кількості секцій обмотки якоря не тільки зменшуються пульсації електромагнітного моменту за амплітудою, а й зростає їх частота, а значить, полегшується задача згладжування пульсацій частоти обертання.

Вплив кута вмикання β на нестабільність моменту. Впливати на величину пульсацій електромагнітного моменту вентильного реактивного двигуна можна і за допомогою зміни кута вмикання секцій. Діапазон його зміни залежить від величини інтервалу комутації секції та від того, чи призначений двигун для реверсивного режиму роботи.

На рис. 6 та рис. 7 представлено результати розрахунків електромагнітного моментів для трисекційного ВРД з послідовними буферами енергії в кожній секції зі сталим значенням інтервалу комутації й різними значеннями кута вмикання.

Результати розрахунків показують, що величина кута вмикання, хоч не в такій мірі як кількість секцій, але все таки впливає на пульсації електромагнітного моменту: його збільшення приводить до збільшення амплітуди пульсацій моменту.

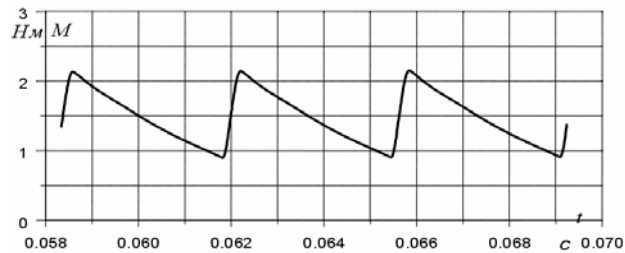


Рис. 6. Електромагнітний момент ВРД ($\beta=10$ ел. град.; $\gamma=125$ ел. град.)

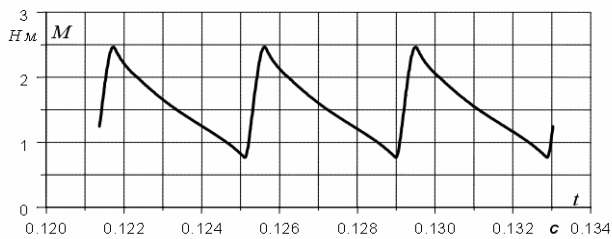
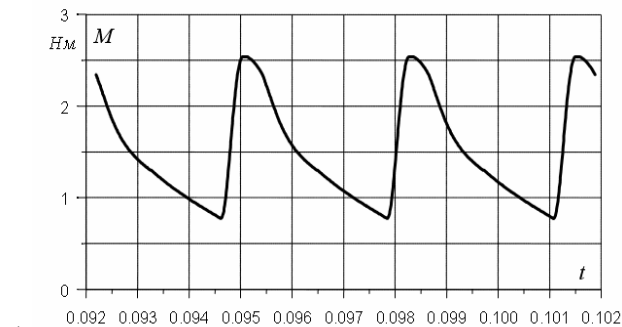
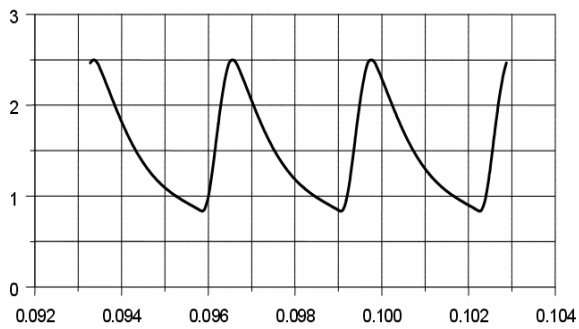


Рис. 7. Електромагнітний момент ВРД ($\beta=35$ ел. град.; $\gamma=125$ ел. град.)

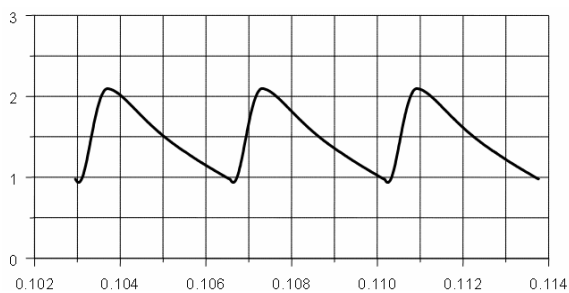
Вплив інтервалу комутації на пульсації моменту. На рис. 8 наведено ілюстрацію алгоритму поступового зменшення рівня пульсації електромагнітного моменту трисекційного ВРД.



а)



б)



в)

Рис. 8. Зменшення рівня пульсації електромагнітного моменту ВРД з послідовним буфером енергії за допомогою вибору параметрів комутації

Форсування вмикання струму на початку інтервалу комутації зумовлене способом керування підживлювальними ключами і є причиною швидкого наростання електромагнітного моменту в цей час й великого рівня його пульсації. У ВРД з послідовним буфером енергії з малою кількістю секцій якорної обмотки ліквідувати повністю пульсації, які викликані форсованим наростанням струму вибором відповідних значень параметрів комутації та величини ємності накопичувального конденсатора не вдається. Проте змен-

шити ці пульсації можна, вибираючи кут вмикання, інтервал комутації та величину ємності конденсатора й розраховуючи в підсистемі дослідження квазіусталений режим роботи для конкретного ВРД.

ВИСНОВКИ

Розроблена математична модель явноплюсних вентильних реактивних двигунів з послідовними ємнісними буферами енергії має високу ступінь адекватності і дозволяє здійснювати комплексні дослідження характеристик та поведінки ВРД у складі електро-механотронних систем за різноманітних режимів роботи.

Порівняння наведених графічних представлень розрахунків електромагнітного моменту показує, що варіацією трьох незалежних параметрів (β , γ і C) можна суттєво зменшити пульсації електромагнітного моменту навіть для ВРД з малою кількістю секцій (від 0,7 у варіанті а, до 0,4 у варіанті в).

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Ткачук В.І. Електромеханотроніка: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 440 с.
- [2] Ткачук В.І. Ємнісний накопичувач енергії у вентильно-реактивному двигуні // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник ДУ "Львівська політехніка". - 1997. - № 334. - С. 125 - 131.
- [3] Ткачук В.І. Вентильний реактивний двигун та його математична модель // Теоретична електротехніка. - 1998. - № 54. - С. 121 - 127.
- [4] Ткачук В. Підсистема автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів // Технічна електродинаміка. - 1998. - С. 180 - 187.
- [5] Tkachuk V.I., Kasha L.V., Greschuk O.V. Mathematical Modeling of SRM with Buffer of Energy // Матеріали 13-го міжнародного симпозіуму з теоретичної електротехніки (ISTET'05), Львів, Україна. 2005. - Р. 308-311.
- [6] Ткачук В.І., Каша Л.В., Грещук О.В. Керований вентильний реактивний двигун з паралельним буфером енергії // Науковий журнал "Технічна електродинаміка" Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність 2004", Ч.3, 2004. – С. 37-40.

Надійшла 30.08.2007

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Чабан А., к.т.н.

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра "Електричні станції"
Україна, 79013, вул. С. Бандери, 12

Запропоновано метод застосування апарата штучного інтелекту, що спирається на нейронні мережі, для аналізу усталених процесів в електромеханічних пристроях з розподіленими параметри. Навчання радіальної штучної нейромережі як один з основних етапів здійснюється виключно методами математичного моделювання.

Предложен метод применения аппарата искусственного интеллекта, основан на нейронных сетях, для анализа установившихся процессов в электромеханических устройствах с распределенными параметрами. Учеба радиальной нейросети как один из основных этапов осуществляется методами математического моделирования.

Стрімкий розвиток методів математичного моделювання все глибше і глибше проникає в найрізноманітніші сфери людської діяльності, залучаючи до своєї теорії сучасні наукові розробки. Однією з таких розробок можна вважати створення апарата штучного інтелекту [1]. Найчастіше тут застосовуються комп'ютерні програми, елементною базою яких є штучні нейронні мережі. Таке поєднання істотно розширює можливості методів математичного моделювання. Однією з перших вдалих спроб поєднання згаданих методів, виходячи з огляду доступної нам літератури, треба назвати [4]. На сьогоднішній день методи теорії штучних нейронних мереж досить широко використовуються в наукових розробках. Не є винятком і електротехніка та прикладна механіка. Для цих наук особливо актуальною є проблема одержання точних параметрів системи, а також діагностика найрізноманітніших станів електромеханічних пристроїв. Запропоновані моделі [2, 3] з високим ступенем адекватності відтворюють поведінку пристрою в будь-яких станах як усталених, так і перехідних. Та для одержання достовірної інформації щодо конкретного пристрою або системи необхідно долучити до математичної моделі значення основних параметрів згаданих пристроїв. І цілком зрозуміло, що неправильне подання цих значень може звести нанівець усю теоретичну побудову. Тому точність обчислених параметрів електромеханічних пристроїв займає не менш важливе місце в аналізі електромеханічних перехідних процесів, ніж сама побудова математичної моделі.

У цій роботі пропонується метод розв'язання двох досить актуальних задач прикладної електротехніки та електромеханіки. Перша задача полягає у вимірюванні коефіцієнта штивності муфтового з'єднання валопроводу глибокопазного асинхронного електроприводу, а друга – у визначенні характеру навантаження турбоагрегату. Розглянемо кожну з цих задач послідовно.

ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ШТИВНОСТІ МУФТОВОГО З'ЄДНАННЯ

У муфтових з'єднаннях валопроводу асинхронних електроприводів виникають значні крутильні коливання, які безпосередньо залежать від коефіцієнта штивності пружної муфти (c) [3]. Але вимірювання штивності пружних муфт є досить непростою справою і вимагає коштовних експериментів, особливо для потужних електроприводів. Виявляється, зазначену проблему можна розв'язати, застосовуючи штучні нейронні мережі. Причому, математична модель бере на себе безпосередню роль супервізора (учителя) нейромережі.

Вхідний сигнал нейромережі формується так. В

усталеному процесі діючі значення струму фази статора мотора та швидкість обертання приводної інерційної ланки залежать від навантаження приводного мотора, тобто від моменту навантаження [3]. Тоді, у залежності від штивності муфти, буде змінюватись різниця кутів повороту ($\Delta\gamma$) обох інерційних ланок (ротора й маховика). Заміряти цю різницю в усталеному процесі ніякої трудності не становить, наприклад, за допомогою давача Холла.

Для навчання однокерункової радіальної мережі запропоновано такі вектори. Вхідні – I, ω (діюче значення струму статора й швидкість обертання приводної інерційної ланки) та вихідний – w_M , де $w_M = k^{-1}M$, M – момент навантаження мотора, k – коефіцієнт перерахунку; w_M – множник моменту. Результати навчання мережі зведено в табл. 1.

I, A	ω, c^{-1}	w_M
14,94734	313,9932	0
15,53321	313,4448	5
16,92898	312,9478	10
19,27799	312,4314	15
22,30789	311,8772	20
25,42806	311,3563	25
28,926	310,8037	30
32,85529	310,1805	35
36,57387	309,6301	40
40,71405	308,9936	45
45,12037	308,2907	50

Для визначення коефіцієнта w_M застосовано нейронну мережу, що має таку архітектуру. Вхідний сигнал складається з 2 рецепторів, захований шар містить 35 нейронів та вихідний сигнал – 1 нейрон. Мережа навчалася градієнтним методом Левенберга-Марквардта в поєднанні з алгоритмом backpropagation, заімплементований мовою програмування Matlab for Windows. В якості порогової функції для захованого шару використано функцію $\tan \text{sig}$, а для вихідного – pureline . Мережа навчилася за 23 епохи, після чого похибка навчання досягла заданого значення менше 2-х %.

На рис. 1 показано структурну схему, на підставі якої здійснюється обчислення коефіцієнта штивності пружної муфти валопроводу електромеханічного пристрою.

На рис. 2 показано графік залежності похибки навчання мережі від кількості епох під час тренування мережі.

На підставі структурної схеми системи (рис. 1) значення коефіцієнта штивності шукаємо так:

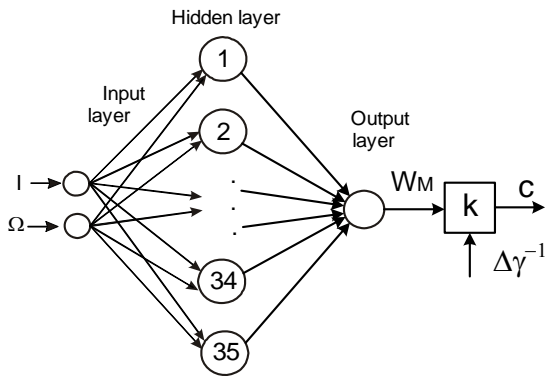


Рис. 1. Структурна схема обчислення коефіцієнта штивності пружної муфти

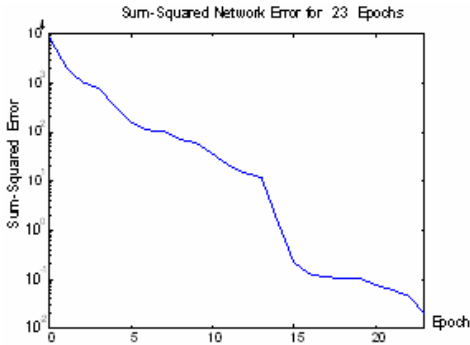


Рис. 2. Залежність помилки навчання від кількості епох

$$c = \frac{M_E}{\Delta\gamma} = \frac{w_M k}{\Delta\gamma} \quad (1)$$

Тестування мережі здійснено для трьох незалежних дослідів. Причому значення коефіцієнтів штивності вибирались довільно. Результати тесту навченої мережі зведено в табл. 2.

I, A	ω, c^{-1}	$k, (Hm)^{-1}$	w_M	$\Delta\gamma_1 \times 10^{-4}$	$\Delta\gamma_2 \times 10^{-4}$	$\Delta\gamma_3 \times 10^{-4}$	$c_1 \times 10^5$	$c_2 \times 10^5$	$c_3 \times 10^5$	ANN- w_M	ANN- $c_1 \cdot 10^5$	ANN- $c_2 \cdot 10^5$	ANN- $c_3 \cdot 10^5$
23,889	311,5752	100	22,50	74,8	15,1	5,7	3	15	39	23,1590	3,01	15,34	40,43
30,892	310,4516	100	32,50	108,2	21,6	8,3	3	15	39	31,8827	2,95	14,76	38,41
38,676	309,2803	100	42,50	142,3	28,6	1,1	3	15	39	41,8534	2,95	14,63	38,04

Таблиця 2

Для навчання однокерункової мережі запропоновано такі вектори: вхідні I, U та вихідні R_n, L_n . Вхідний сигнал формується так. В усталеному процесі діючі значення струму фази якоря та лінійної напруги генератора можемо обчислити з використанням трансформаторів струму та напруги амперметром та вольтметром. Результати навчання мережі зведено в табл. 3.

У таблиці прийнято такі позначення: I – діюче значення струму фази якоря; U – діюче значення лінійної напруги статора; R, L – значення опору та індуктивності навантаження генератора відповідно; k_R, k_L – коефіцієнти перерахунку за опором та індуктивністю відповідно (див. табл. 3).

Таблиця 3

$I \cdot 10^{-4}, A$	$U \cdot 10^{-4}, B$	k_R	$R, Ом$	k_L	$L, Гн$
5830,765	17781,57	1,0	1,562	1,0	0,00255
5392,95	23183,8	1,5	2,343	1,0	0,00255
4917,039	27517,98	2	3,124	1,0	0,00255
4455,409	30809,77	2,5	3,905	1,0	0,00255
4036,021	33277,05	3	4,686	1,0	0,00255
5358,119	18349,48	1,0	1,562	1,5	0,003825
5010,903	22920,77	1,5	2,343	1,5	0,003825

У таблиці ANN позначено вихідний сигнал, згенерований нейромережею.

Застосування методу Левенберга-Марквардта в поєднанні з алгоритмом backpropagation дало змогу відносно швидко (за 23 епохи) навчити мережу обчислювати значення коефіцієнта w_M , а відтак і обчислювати значення коефіцієнта штивності податливої ланки (пружної муфти), що, безперечно, значною мірою залежить від величини захованого шару (35 нейронів).

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРУ НАВАНТАЖЕННЯ

Синхронні турбогенератори працюють зазвичай паралельно з електроенергетичною системою. Очевидно, що корисна потужність генератора в значній мірі залежить від параметрів системи, яку умовно, в певному наближенні, можна представити як $R-L-C$ ланку. Якщо вважати величину еквівалентної ємності незмінною, то потужність, генерована турбоагрегатом, буде залежати від величини опору та індуктивності, які задані електроенергетичною системою. У випадку роботи генератора на автономне $R-L$ навантаження величина цих параметрів може змінюватись під час роботи пристрою. Тоді виникає істотне запитання: як виміряти згадані величини, не використовуючи складні вимірні пристрої, а користуючись лише інформацією про величини діючих значень лінійної напруги та струму фази якоря генератора. Визначення комбінації числових значень згаданих параметрів можна здійснити, застосовуючи апарат штучного інтелекту. Тобто застосування штучних нейромереж дає змогу визначати параметри системи, зменшуючи число вимірної апаратури, у нашому випадку ватметра (відсутність коефіцієнту активної потужності – $\cos\phi$). І знову, математична модель турбоагрегату виступає в ролі супервізора мережі [2].

Продовження таблиці 3

4621,114	26857,94	2	3,124	1,5	0,003825
4233,117	30020,71	2,5	3,905	1,5	0,003825
3868,494	32474,64	3	4,686	1,5	0,003825
4951,932	19250,82	1,0	1,562	2	0,0051
4673,842	23052,15	1,5	2,343	2	0,0051
4352,421	26543,22	2	3,124	2	0,0051
4023,994	29495,02	2,5	3,905	2	0,0051
3706,463	31865,93	3	4,686	2	0,0051
4599,562	20286,85	1,0	1,562	2,5	0,006375
4374,229	23428,25	1,5	2,343	2,5	0,006375
4107,333	26482,12	2	3,124	2,5	0,006375
3827,488	29179,32	2,5	3,905	2,5	0,006375
3552,231	31437,25	3	4,686	2,5	0,006375
4291,158	21350,7	1,0	1,562	3	0,00765
4106,714	23947,86	1,5	2,343	3	0,00765
3884,25	26601,4	2	3,124	3	0,00765
3644,84	29037,67	2,5	3,905	3	0,00765
3404,875	31148,7	3	4,686	3	0,00765

На рис. 3, 4 показано архітектуру нейронної мережі та залежність помилки навчання від кількості епох, необхідних для досягнення прийнятного рівня помилки відповідно.

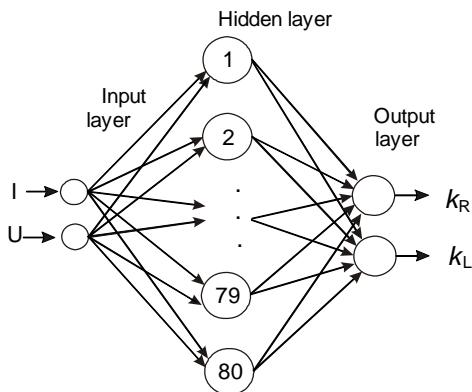


Рис. 3. Архітектура штучної нейромережі

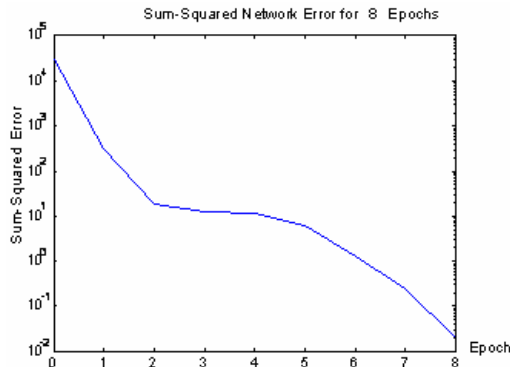


Рис. 4. Залежність помилки навчання від кількості епох

Для визначення характеру навантаження турбогенератора (визначення параметрів опору та індуктивності навантаження) застосовано нейронну мережу, що має таку архітектуру. Вхідний сигнал складається з 2-х рецепторів, захищений шар містить 80 нейронів, а вихідний сигнал – 2 нейрони. Мережа навчалася знову ж таки градієнтним методом Левенберга-Марквардта в поєднанні з алгоритмом backpropagation, заімплементований мовою програмування Matlab for Windows. В якості порогової функції для захищеного шару як і в попередньому випадку використано функцію $\tan \text{sig}$, а для вихідного – purelin . Мережа навчилася за 8 епох, після чого похибка навчання досягла заданого значення менше 2-х %.

Після навчання мережа підлягає тестуванню для чотирьох варіантів комбінації параметрів навантаження. Зауважимо, що значення параметрів вибирались довільно. Результати тесту зведено в табл. 4.

Таблиця 4

$I \cdot 10^{-4}, \text{A}$	$U \cdot 10^{-4}, \text{B}$	k_R	ANN- k_R	k_L	ANN- k_L
4651,598	21477,55	1,25	1,23732	2,25	2,24692
3864,954	27854,57	2,25	2,24887	2,75	2,66637
5024,579	24759,6	1,9	1,94055	1,2	1,15602
4161,581	31369,14	2,7	2,68801	1,3	1,30770

Використання методу Левенберга-Марквардта в поєднанні з алгоритмом backpropagation уможливило надзвичайно швидко (за 8 епох) навчити мережу ідентифікувати значення коефіцієнтів, що, безперечно, у значній мірі залежить від правильно вибраної величини захищеного шару (80 нейронів).

ВИСНОВКИ

Застосування апарата штучного інтелекту дає змогу істотно спростити процедуру діагностики електромеханічних пристроїв і систем. А в окремих випадках застосування згаданого апарата є практично єди-

ним методом досягнення мети. Так, аналізуючи асинхронний електропривід та турбогенератор за допомогою штучних нейронних мереж, переслідувалася водночас й інша мета – проектування правильної архітектури мережі, підготовки даних та реалізацію процесу навчання мережі. Враховуючи неперервний характер функції вхідного сигналу (в даному випадку струм в обмотці статора, швидкість обертання приводної інерційної ланки, та лінійна напруга на виводах якоря), в архітектурі мережі можна обійтися одним захищеним шаром (згідно з теоремою Колмогорова [1]).

У випадку, коли мережа реалізує нелінійні відображення, слід використовувати нелінійні мережі. Це значить, що принаймні один з шарів (захищений чи вихідний) повинен мати нейрони з нелінійною функцією активації (трансформантою).

Для збільшення довжини вхідного вектора досить часто застосовують розклад функції усталеного струму статора в ряд Фур'є [5]. Вхідними сигналами мережі тоді приймають як амплітуди, так і фазові кути вибраного спектру гармонічних компонент. Такий метод забезпечує універсальність запропонованого підходу, не застосовуючи додаткової вимірної апаратури.

У випадку застосування радіальних мереж під час розв'язання класифікаційних задач для даних тестування, які відрізняються від навчальних даних, забезпечується не лише інформація, до якого класу належить тестований зразок, але вказується на можливість утворення окремого класу. Особливо істотною ця проблема є для тих питань, для яких нема певності, що під час навчання використано достатню кількість навчальних зразків. Важливою перевагою радіальних мереж є значно простіший алгоритм навчання. За наявності лише одного захищеного шару та за точного пов'язання активності нейрону з відповідною зоною простору навчальних даних початкова точка навчання є значно ближчою до оптимального розв'язку, ніж це є можливим в багатошарових мережах.

У згаданих випадках аналізу електромеханічних пристроїв досягнуто задовільних результатів тестування, що свідчить про правильність вибору архітектури штучних нейронних мереж як відповідного інструменту для розв'язування поставлених задач. Запропонований метод може в майбутньому бути застосований для створення цифрових систем, призначених для виявлення дефектів досліджуваних об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А. Нейронные сети в системах автоматизации. – К.: Техніка, 1999. – 364 с.
- [2] Чабан А. А-модель турбогенератора у фазних координатах струмів // Електротехніка і електромеханіка. – 2007'1. – С. 37 – 41.
- [3] Чабан А. Математичне моделювання електромеханічних коливних процесів багатомасової системи з асинхронним приводом // Електротехніка і електромеханіка. – 2006'2. – С. 62 – 65.
- [4] Чабан В., Кватер Т., Бартман Я. Діагностика електромагнетного кола за допомогою штучної нейронної мережі // Електромеханіка. Теорія і практика (Праці наук.-техн. конф., присвяченої 100-річчю Т. Губенка) – 25-28 вересня 1996. – Львів – Славськ. – С. 191 – 193.
- [5] Tchaban A., Twarog B. Simulation of lateral vibrations of induction motors // The 2003 Conference best of AMSE Press. – France. – 2003. – P. 17 – 26.

Надійшла 3.09.2007

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛНОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПАКЕТА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ С ПЕРЕМЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ПРОВОДИМОСТИ

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

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

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

На основі положень квантової фізики і класичної електродинаміки запропоноване наближене співвідношення для розрахункової оцінки подовжнього зміщення в часі електронних напівхвиль де Бройля в тонкому металевому провіднику з перемінним або двополярним імпульсним електричним струмом провідності.

На основе положений квантовой физики и классической электродинамики предложено приближенное соотношение для расчетной оценки продольного смещения во времени электронных полувольт де Бройля в тонком металлическом проводнике с переменным или двуполярным импульсным электрическим током проводимости.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на весьма высокий уровень развития в настоящее время теоретической электротехники и электрофизики, квантовой физики и механики [1-3], вопросы теоретического описания микропроцессов на атомарном (электронном) уровне в материале металлических проводников, по которым протекает электрический ток проводимости различных амплитудно-временных параметров (АВП), не нашли на сегодня у специалистов из указанных областей знаний должного внимания и глубокой научной разработки.

В [4-8] автором были представлены определенные теоретические результаты по оригинальному применению квантовомеханического подхода к изучению процессов формирования и распределения униполярного электрического тока проводимости в тонком металлическом проводнике. Для дальнейшего исследования электромагнитных и тепловых процессов внутри материала таких проводников с электрическим током проводимости, обусловленным возникновением в нем стоячих электронных "дебройлевских" полувольт, описываемых соответствующим дискретным набором волновых ψ – функций, требуется знать величину продольного смещения указанных электронных полувольт в случае изменения протекающего по проводнику тока проводимости по амплитуде и направлению протекания с течением времени.

Целью статьи является приближенная расчетная оценка продольного смещения во времени электронных полувольт де Бройля, возникающих в металлическом проводнике с переменным или двуполярным импульсным электрическим током проводимости различных АВП.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пусть по тонкому сплошному круглому однородному металлическому проводнику цилиндрической формы радиусом r_{Π} и длиной l_{Π} вдоль его продольной оси OZ протекает известный из классической физики переменный или двуполярный импульсный электрический ток проводимости $i_{\Pi}(t)$ с произвольными АВП, равномерно распределенный с плотностью $\delta_{\Pi}(t)$ по его поперечному сечению $S_{\Pi} = \pi r_{\Pi}^2$

(рис.). Примем, что выполняется условие вида $l_{\Pi} \gg r_{\Pi}$, а неподвижный изотропный проводник размещен в изоляционной газовой (конденсированной) среде при комнатной температуре, равной $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$.

Считаем, что в исследуемом проводнике поведение в межатомном пространстве его материала свободных электронов, характеризующихся корпускулярно-волновым дуализмом, приближенно подчиняется одномерному временному волновому уравнению Шредингера и описывается на его основании соответствующими стоячими электронными полуволнами – собственными волновыми ψ – функциями [4, 8]. Данные волновые ψ – функции, как известно, определяют в металлическом проводнике пространственно-временную эволюцию и закономерности продольного распределения свободных электронов и формируют волновой электронный пакет (ВЭП) проводника с электрическим током проводимости [5, 8].

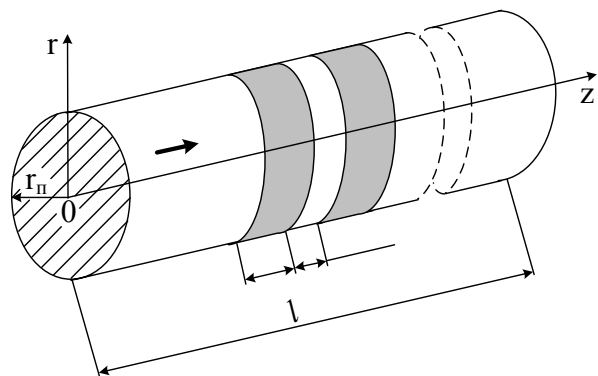


Рис. Расчетная модель проводника с переменным электрическим током проводимости $i_{\Pi}(t)$

ВЭП рассматриваемого проводника (квантованный дискретный набор собственных волновых ψ – функций проводника) макроскопически распределяется вдоль его продольной оси OZ в периодическую структуру, шаг которой равен сумме ширин относительно "горячего" Δz_{Γ} и "холодного" Δz_{χ} продольных участков проводника [5, 7] (см. рис.). Экспериментально подтвержденные формулы для расчета

величин Δz_{Γ} и Δz_{χ} автором приведены в [7, 9]. Исходя из [4, 8] и известных положений квантовой физики и механики, считаем, что свободные электроны в межатомном пространстве материала исследуемого металлического проводника распределяются в его продольном направлении в соответствии с числовой последовательностью изменения целого квантового числа $n=1,2,3,\dots$ электронных полувольт де Бройля и подчиняются квантовой статистике Ферми–Дирака [10, 11]. Требуется на основе положений классической электродинамики и квантовой физики определить продольное смещение $\Delta z_{ЭПВ}$ во времени t электронных полувольт де Бройля в металлическом проводнике с переменным (двуполярным импульсным) электрическим током проводимости $i_{\Pi}(t)$.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД ПО ОЦЕНКЕ ПРОДОЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ В ПРОВОДНИКЕ

Согласно [4, 8] на длине l_{Π} исследуемого проводника с электрическим током проводимости $i_{\Pi}(t)$ всегда умещается целое квантовое число $n=1,2,3,\dots$ стоячих электронных полувольт де Бройля, длина которых удовлетворяет следующему квантовому соотношению:

$$\lambda_{en}/2 = l_{\Pi}/n, \quad (1)$$

где $\lambda_{en} = h/m_e v_{en}$ – квантованная длина волны свободного электрона в материале проводника, равная длине соответствующей стоячей электронной волны де Бройля для рассматриваемой элементарной частицы с полуцельным спином – фермиона; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя свободного электрона; $v_{en} = nh/2m_e l_{\Pi}$ – квантованная скорость упорядоченного движения (дрейфа) свободного электрона в материале проводника.

Причем, на ширине каждой электронной полуволны $\lambda_{en}/2$ де Бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости $i_{\Pi}(t)$ умещается один относительно "горячий" шириной Δz_{Γ} и один относительно "холодный" шириной Δz_{χ} продольный участок ВЭП проводника [7, 9]. Следует напомнить читателю тот факт, что в рассматриваемом проводнике каждый свободный электрон характеризуется двумя скоростями [8, 10]: *во-первых*, тепловой (хаотичной) и не имеющей преимущественного направления скоростью $v_{eT} = (2W_F/m_e)^{1/2}$, где W_F – энергия Ферми (например, для стального проводника, примененного в [12] при исследовании "горячих" и "холодных" участков ВЭП проводника с постоянным электрическим током проводимости большой плотности, усредненное значение энергии Ферми примерно составляет $W_F = 10,67 \cdot 10^{-19}$ Дж [10]), которая для стального проводника принимает большое численное значение, составляющее примерно $v_{eT} = 1,53 \cdot 10^6$ м/с; *во-вторых*, дрейфовой квантованной и направленной строго вдоль проводника скоростью v_{en} , обусловленной приложен-

ным к проводнику переменным электрическим напряжением $U_{\Pi}(t)$, вызывающим возникновение внутри материала проводника продольного электрического поля напряженностью $E_{\Pi}(t) = U_{\Pi}(t)/l_{\Pi}$ и соответственно появление электродинамической силы $F_e = e_0 \cdot E_{\Pi}(t)$, действующей на элементарный отрицательный электрический заряд электрона, равный $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, и заставляющей его перемещаться вдоль вектора напряженности электрического поля $E_{\Pi}(t)$, и соответственно принимающей для указанного стального проводника даже в области сильноточной импульсной техники (при $\delta_{\Pi}(t)$ порядка 10^{10} А/м²) незначительное усредненное численное значение, составляющее в рассматриваемом случае не более $v_{en} \leq 0,37$ м/с [13]. Видно, что $v_{en} \ll v_{eT}$. Поэтому и приобретенная свободным электроном за счет ускорения в продольном электрическом поле проводника дополнительная усредненная кинетическая энергия W_{eK} будет ничтожно мала по сравнению с его энергией Ферми W_F , то есть $W_{eK} \ll W_F$. В этой связи можно заключить, что в металлическом проводнике с электрическим током проводимости произвольных АВП максимальное значение энергии свободного электрона в случае незначительных изменений первоначальной температуры θ_0 его материала и отсутствия поступления извне внутрь проводника внешних интенсивных квантов энергии излучения будет практически равно энергии Ферми W_F .

В нашем случае для приближенной оценки продольного смещения $\Delta z_{ЭПВ}$ во времени электронных полувольт де Бройля (периодической структуры ВЭП проводника) с учетом положений классической электронной теории электропроводности металлов [10] целесообразно воспользоваться средней дрейфовой скоростью v_D свободного электрона в металлическом проводнике, равной [13, 14]:

$$v_D = \delta_{\Pi}(t) / e_0 \cdot n_{e0}, \quad (2)$$

где n_{e0} – усредненная плотность свободных электронов в материале проводника (м⁻³) до воздействия на него напряжения $U_{\Pi}(t)$ и соответственно протекания в нем электрического тока проводимости $i_{\Pi}(t)$.

Как известно, усредненная плотность n_{e0} свободных электронов в металлическом проводнике равна концентрации его атомов N_0 (м⁻³), умноженной на валентность материала проводника, определяемую числом неспаренных электронов на внешних валентных энергетических уровнях атомов материала исследуемого проводника (например, для стального проводника валентность примерно равна двум [15]). Кроме того, для расчетной оценки концентрации атомов N_0 в металлическом проводнике с плотностью его материала d_{Π} (кг/м³) можно воспользоваться следующим известным соотношением [16]:

$$N_0 = d_{\Pi} (M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27})^{-1}, \quad (3)$$

где M_a – атомная масса материала проводника (например, для стального проводника $M_a = 55,85$ [15]), практически равная массовому числу A ядра атома металлического проводника, определяемому в соответствии с периодической системой химических элементов Менделеева (одна атомная единица массы равна 1/12 массы атома изотопа углерода $^{12}_6C$, численно составляющей $1,6606 \cdot 10^{-27}$ кг).

Тогда, при изменении во времени t направления протекания в рассматриваемом проводнике переменного или двуполярного импульсного электрического тока проводимости $i_{\Pi}(t)$ для вычисления величины продольного смещения $\Delta z_{\text{ЭПВ}}$ его ВЭП можно приближенно записать:

$$\Delta z_{\text{ЭПВ}} = \tau_{\text{ПВ}} \cdot v_D, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{ПВ}}$ – длительность отрицательной (положительной) полуволны тока $i_{\Pi}(t)$ в материале проводника.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРОДОЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ В ПРОВОДНИКЕ

Выполним на основе предложенного расчетного выражения (4) количественную оценку величины продольного смещения $\Delta z_{\text{ЭПВ}}$ электронных полувольт де Бройля в тонком оцинкованном стальном проводнике ($l_{\Pi} = 118$ мм; $r_{\Pi} = 0,15$ мм; $\delta_{\Pi}(t) = 6,87 \cdot 10^8$ А/м²; $n_{e0} = 16,86 \cdot 10^{28}$ м⁻³), по которому протекает: а) переменный гармонический ток промышленной частоты 50 Гц; б) двуполярный затухающий синусоидальный импульсный ток частотой 10^5 Гц. Как известно, первый случай соответствует устройствам, используемым в силовой электротехнике (электроэнергетике) [17], а второй – устройствам, применяемым в электроразрядных технологиях и технике больших импульсных токов и сильных магнитных (электрических) полей [13, 18]. Согласно принятым исходным данным, (2) и (3) следует, что для рассматриваемых случаев средняя дрейфовая скорость v_D свободных электронов в стальном проводе равна 0,0255 м/с. Так как для частоты 50 Гц величина длительности полувольты (полупериода) тока составляет $\tau_{\text{ПВ}} = 10$ мс, то для первого случая в соответствии с (4) искомая величина продольного смещения $\Delta z_{\text{ЭПВ}}$ в стальном проводнике ВЭП оказывается численно равной 0,255 мм. Во втором нашем случае длительность токовой полувольты принимает значение, равное $\tau_{\text{ПВ}} = 5$ мкс. Поэтому здесь согласно (4) величина продольного смещения $\Delta z_{\text{ЭПВ}}$ электронных полувольт де Бройля будет равна примерно 0,13 мкм. Для сравнения полученных расчетных данных для $\Delta z_{\text{ЭПВ}}$ с известными экспериментально установленными геометрическими параметрами для ВЭП металлического проводника отметим, что в случае протекания по выбранному тонкому оцинкованному стальному проводу постоянного тока указанной плотности ($\delta_{\Pi} = 6,87 \cdot 10^2$ А/мм²) опытное значение продольной ширины ВЭП $\Delta z_{\text{ВЭП}}$ численно

составляет 3,84 мм [12]. Приведенные нами данные позволяют заключить, что в наших случаях выполняется неравенство $\Delta z_{\text{ЭПВ}} \ll \Delta z_{\text{ВЭП}}$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На практике в слабо- и сильноточной импульсной технике величиной продольного смещения $\Delta z_{\text{ЭПВ}}$ во времени ВЭП в металлических проводниках с электрическим током проводимости различных АВП можно пренебрегать.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тамм И.Е. Основы теории электричества.- М.: Наука, 1976. - 616 с.
- [2] Займан Дж. М. Современная квантовая теория/ Пер. с англ. под ред. В.Л. Бонч-Бруевича.- М.: Мир, 1971.-288 с.
- [3] Дирак П.А.М. Принципы квантовой механики/ Пер. с англ. под ред. акад. В.А. Фока.- М.: Наука, 1979.-480 с.
- [4] Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехника.-2005.- №7.- С. 25-33.
- [5] Баранов М.И. Волновой электронный пакет проводника с электрическим током проводимости // Электротехника і електромеханіка.-2006.- №3.-С.49-53.
- [6] Баранов М.И. Квантовомеханическая модель быстрого нагрева проводника электрическим током проводимости большой плотности/Электротехника.-2006.-№4.- С. 38-44.
- [7] Баранов М.И. Энергетический и частотный спектры свободных электронов проводника с электрическим током проводимости // Электротехника.-2006.- №7.- С. 29-34.
- [8] Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике // Технічна електродинаміка.-2007.-№1.-С. 13-19.
- [9] Баранов М.И. Эвристическое определение максимального числа электронных полувольт де Бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости // Электротехніка і електромеханіка.-2007.- №6.- С. 69-73.
- [10] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990. - 624 с.
- [11] Баранов М.И. Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики и ядерной энергетики // Электротехніка і електромеханіка.-2007.-№2.- С. 5-12.
- [12] Марахтанов М.К., Марахтанов А.М. Периодические изменения температуры по длине стальной проволоки, вызванные электрическим током// Вестник МГТУ им. Баумана. Серия: Машиностроение.-2003.-№1.-С.37-47.
- [13] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972.- 391 с.
- [14] Баранов М.И. Упрощенная математическая модель микропроцессов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехніка і електромеханіка.-2006.- №2.- С. 66-70.
- [15] Астафуров В.И., Бусев А.И. Строение вещества.- М.: Просвещение, 1977.- 160 с.
- [16] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.-864с.
- [17] Баранов М.И. Никола Тесла и современная электротехника // Электротехніка і електромеханіка.-2006.- №2.- С. 5-11.
- [18] Гулий Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.- Киев: Наукова думка, 1990.- 208 с.

Поступила 03.07.2007

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Борцов А.В.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния"
Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"
тел. (057) 70-76-183, факс (057) 70-76-183, E-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Розроблений і виготовлений генератор імпульсних струмів для фізичного моделювання імпульсних електромагнітних полів. При розробці генератора використані новітні досягнення в області напівпровідникової техніки і комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів в силовому контурі генератора. Отримані нові форми імпульсів розрядного струму - аперіодичний імпульс, одна напівхвиля гармонійного імпульсу, зрізана напівхвиля гармонійного імпульсу.

Разработан и изготовлен генератор импульсных токов для физического моделирования импульсных электромагнитных полей. При разработке генератора использованы новейшие достижения в области полупроводниковой техники и компьютерное моделирование электромагнитных процессов в силовом контуре генератора. Получены новые формы импульсов разрядного тока – аperiodический импульс, одна полуволна гармонического импульса, срезанная полуволна гармонического импульса.

ВВЕДЕНИЕ

В магнитно-импульсной обработке металлов (МИОМ) раздача цилиндрической заготовки может быть осуществлена при помощи внешнего индуктора [1]. При этом эффективность технологической операции повышается путем формирования срезанного импульса внешнего магнитного поля. Создание магнитно-импульсных установок, генерирующих такие импульсы, является сложной технической задачей. Поэтому исследование электромагнитного поля системы "индуктор – заготовка" в случаях срезанных импульсов удобно выполнять на модели генератора импульсных токов (ГИТ).

В данной статье описан низковольтный ГИТ, который, благодаря применению новой элементной базы и дополнительных электронных блоков, обладает улучшенными характеристиками и более широкими функциональными возможностями, чем известные [2, 3]. К ним относятся, прежде всего, формирование срезанного импульса тока в виде только первой полуволны экспоненциально затухающей синусоиды или ее части, а также создание импульсов тока с частотой до 100 кГц при амплитуде до 1 кА.

Это достигается применением новейших разработок в области полупроводниковых приборов - быстродействующих мощных высоковольтных диодов, тиристоров и транзисторов, аналоговых и цифровых микросхем [4], усовершенствованием электрической схемы и конструкции ГИТ.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ ГИТ

Функциональная схема ГИТ включает следующие основные блоки (рис. 1):

- входной контур (ВК);
- зарядный контур (ЗК);
- конденсаторная батарея (КБ);
- разрядный контур (РК);
- нагрузка (Н);
- блок управления (БУ);
- измерительный блок (ИБ).

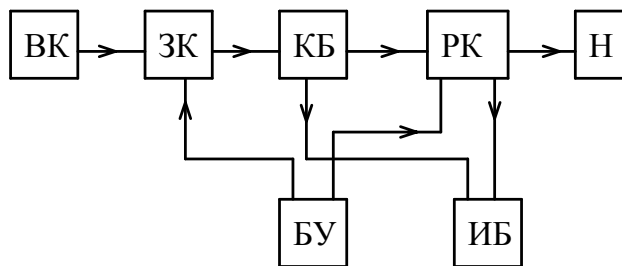


Рис.1. Функциональная схема ГИТ

Входной контур предназначен для подключения ГИТ к источнику энергии (220 В, 50 Гц) и включает в себя автомат токовой защиты, реле – пускатель и систему индикации.

Зарядный контур используется для зарядки конденсаторной батареи. Основными элементами зарядного контура являются зарядный резистор и зарядный тиристор.

В разрядном контуре формируются требуемые импульсы тока в нагрузке. РК состоит из конденсаторной батареи, разрядного тиристора, обратных диодов, измерительного шунта и клемм для подключения нагрузки.

Входной, зарядный и разрядный контуры вместе с нагрузкой образуют силовой контур ГИТ.

Блок управления и измерительный блок – составные части системы управления и измерений.

Конструктивно ГИТ выполнен на материнской плате, к которой жестко прикреплена передняя панель с органами управления, элементами индикации и измерений, клеммами для подключения нагрузки. Там же крепится блок управления в металлическом экране для защиты от электромагнитных помех.

Конденсаторная батарея С состоит из 5 бумажно-масляных конденсаторов емкостью 1 мкФ, 2 мкФ, 4 мкФ, 10 мкФ и 10 мкФ. Длительность импульса разрядного тока можно регулировать изменением емкости конденсаторной батареи.

Для уменьшения индуктивности разрядного контура и влияния скин-эффекта монтаж разрядного кон-

тура выполнен медными шинами шириной 30 мм, толщиной 0,3 мм минимальной длины. С этой же целью переключения конденсаторов и дополнительных элементов (диодов и резисторов) осуществляются отрезками таких же шин длиной 30 мм.

Сигнал импульса разрядного тока $i(t)$ снимается с токового шунта двумя экранированными витыми парами на коаксиальный разъем и плату амплитудного амперметра. Аналогичной витой экранированной парой на плату амплитудного вольтметра подается напряжение с зажимов конденсаторной батареи.

Внешний вид ГИТ со снятым защитным кожухом показан на рис. 2.

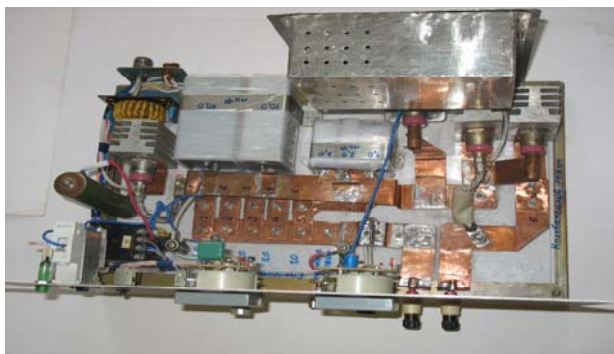


Рис. 2. Внешний вид ГИТ (вид сверху)

Принцип работы ГИТ заключается в следующем. Во время действия положительной полуволны сетевого напряжения конденсаторная батарея заряжается до напряжения U_3 . Зарядный ток ограничен зарядным резистором R_3 . Величина зарядного напряжения U_3 изменяется в диапазоне (0 – 300) В методом широтно-импульсного регулирования (временем включения зарядного тиристора $VS1$). Так как ГИТ не имеет гальванической изоляции от питающей сети, электробезопасность при работе ГИТ обеспечивается реле – пускателем $K1$. Через (20 – 30) мкс после перехода сетевого напряжения через 0 тиристор $VS1$ выключается и подается импульс управления на разрядный тиристор $VS2$. Начинается цикл разряда конденсаторной батареи C на индуктивную нагрузку L . Конденсаторная батарея C , разрядный тиристор $VS2$, измерительный шунт $R_{ш}$ и нагрузка L постоянно включены в разрядный контур ГИТ.

В разрядном контуре ГИТ реализуются такие формы импульсов тока.

1. Экспоненциально затухающая синусоида

$$i(t) = I_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (1)$$

где I_0, α, ω - постоянные.

Для создания импульса (1) с помощью ключа $SA1$ включаем диод $VD1$. Суммарное активное сопротивление разрядного контура R (с учетом сопротивления шунта $R_{ш}$) должно соответствовать известному условию такого разряда [5]

$$R < 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

2. Аперриодический импульс

$$i(t) = I_0 (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}), \quad (2)$$

где I_0, α_1, α_2 - постоянные.

Для такого импульса при включенном диоде $VD1$ необходимо выполнение условия [5]

$$R \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

3. Первая полуволна зависимости (1)

$$i(t) = \begin{cases} I_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t, & 0 \leq \omega t \leq \pi; \\ 0, & \omega t > \pi, \end{cases} \quad (3)$$

где I_0, α, ω - постоянные.

Импульс (3) получается при отключенном диоде $VD1$ и включенной цепи $VD2, R2$.

4. Срезанная первая полуволна зависимости (1)

$$i(t) = \begin{cases} I_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t, & 0 \leq \omega t \leq \omega t_c; \\ I_{0c} e^{-\alpha_c t}, & t > t_c, \end{cases} \quad (4)$$

где $I_0, I_{0c}, \alpha, \omega, \alpha_c, t_c$ - постоянные.

Для получения импульса (4) необходимо включить диоды $VD1$ и $VD3$.

Амплитуды зарядного напряжения U_3 и тока в разрядном контуре I_m контролируются с помощью амплитудных вольтметра и амперметра (рис. 3 и 4).

Осциллограмму зарядного напряжения $U_3(t)$ можно получить на экране электронного осциллографа с помощью стандартного аттенюатора 1:10, подключенного к зажимам конденсаторной батареи C .

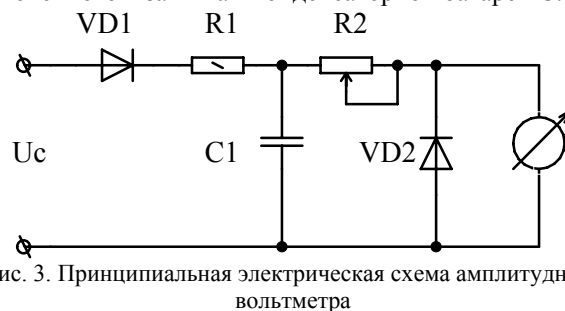


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема амплитудного вольтметра

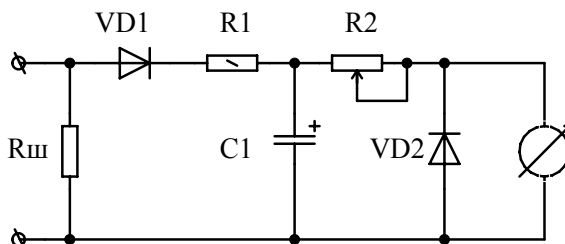


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема амплитудного амперметра

Принципиальная электрическая схема силового контура ГИТ показана на рис.5.

Для исследования формы разрядного тока $i(t)$ используются осциллограммы напряжения на бифилярном токовом шунте $R_{ш}$ из нихромовой ленты. Сопротивление шунта $R_{ш} = 10 \text{ МОМ} \pm 5\%$.

Алгоритм работы силового контура ГИТ задается блоком управления.

Для исследования формы разрядного тока $i(t)$ используются осциллограммы напряжения на бифилярном токовом шунте $R_{ш}$ из нихромовой ленты. Сопротивление шунта $R_{ш} = 10 \text{ МОМ} \pm 5\%$.

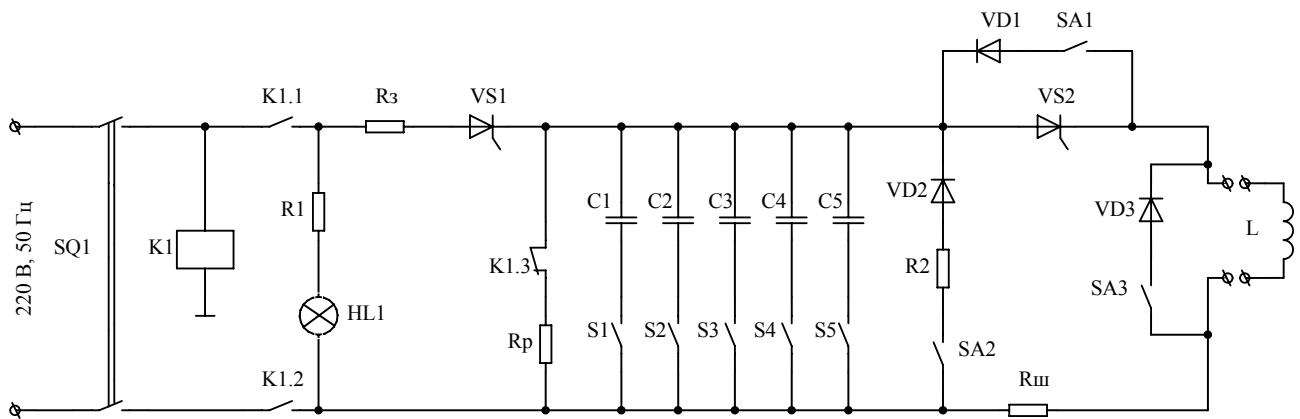


Рис.5. Принципиальная электрическая схема силового контура ГИТ

Алгоритм работы силового контура ГИТ задается блоком управления.

БЛОК УПРАВЛЕНИЯ ГИТ

На рис. 6 показана принципиальная электрическая схема блока управления.

Блок управления содержит следующие функциональные узлы:

стабилизатор напряжения + 15 В (C1, TR1, VD1, C2, DA1, C3, C4, L1, C7, C8, R19), обеспечивающий питание всех электронных узлов блока управления;

высокочастотный преобразователь напряжения (VT11, VT12, R50, R51, TR2, VD9, VD11, L2, L3, C21, C22) для гальванической развязки БУ и цепей управления тиристорами VS1, VS2;

узел синхронизации с сетью 220 В (R2, U1, R3, R4, VT1, R5) определяет моменты перехода сетевого напряжения через 0;

ждуший мультивибратор (DD1.1, C6, R7, VD4, DD1.2, C19, R47, DD3, C2, R48, R49) формирует сигналы управления разрядным тиристором VS2;

формирователь сигнала управления зарядным тиристором VS1 (R8, R9, R10, R12, VT2, DA2, C9, R11, R14, R15, R18, R18, C10, C11, R20, VD5, VD6, R22, C14, VD10, R23, R37, R38, R13, R16, VD12, C23, DD2.4, VT3, R21, R34, U2, R35, VT4, VT7, R39, R40, R41, C15, C16);

формирователь сигнала управления зарядным тиристором VS1 в ручном режиме – одиночные импульсы (SA1, R24, C12, VD7, R25, DD1.3, R27, C13, VD8, R26, DD1.4, R28, R29, VT5, VT6, R30, DD2.3);

электронный переключатель режимов работы ГИТ "Автоматический – Ручной" (SB1, DD2.1, DD2.2, R31, R32, R33, VT8, R36, R46, U3, R44, VT9, VT10, R42, R43, R45, C17, C18).

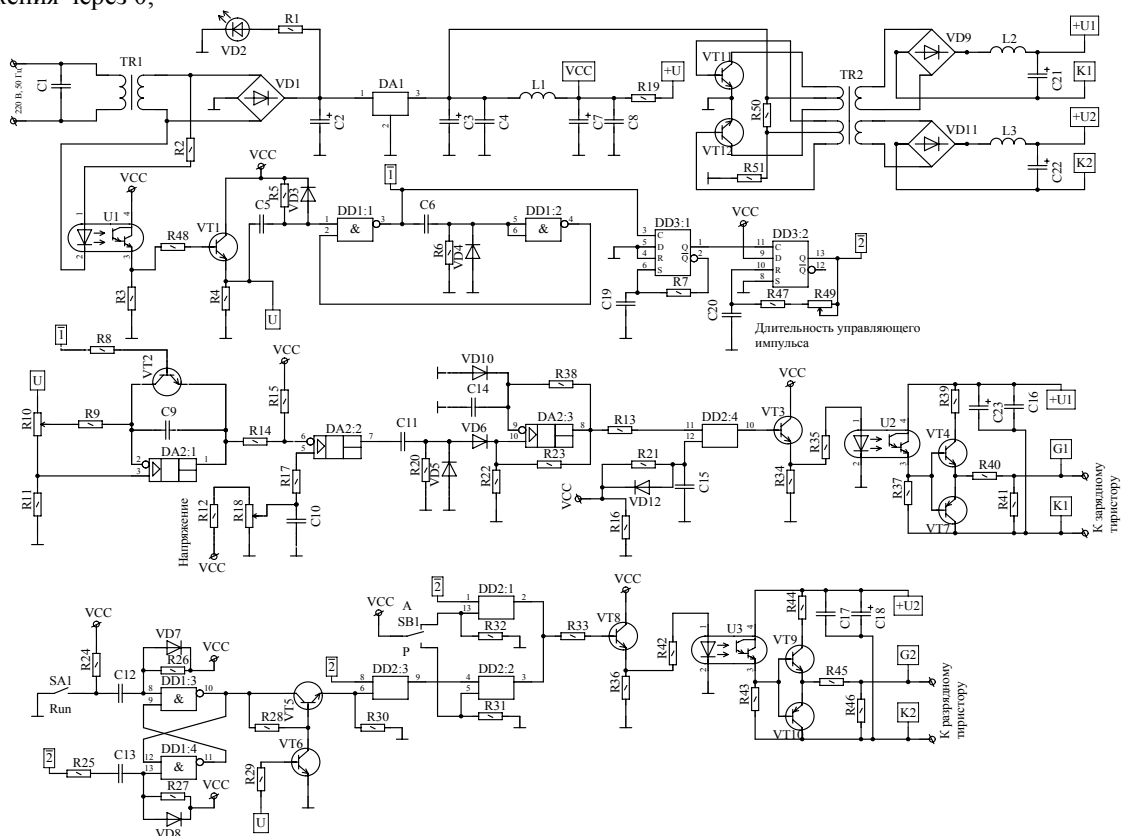


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема блока управления ГИТ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ

Электромагнитные процессы в силовом контуре ГИТ теоретически исследованы с помощью пакета прикладных программ для ПК Electronics Work Bench Pro [6]. На рис. 7 показана расчетная модель силового контура ГИТ в среде Electronics Work Bench Pro. Расчетная модель позволяет оперативно изменять параметры разрядного контура и исследовать различные режимы работы ГИТ.

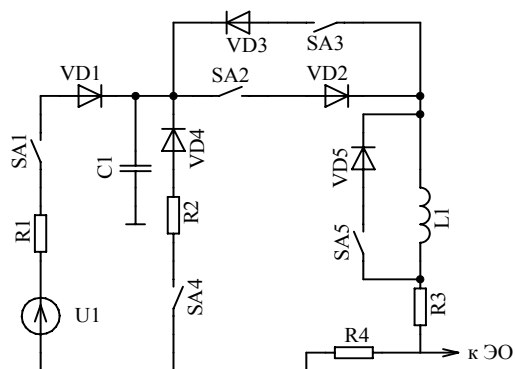


Рис 7. Расчетная модель силового контура ГИТ

В расчетной модели зарядный и разрядный тиристоры смоделированы ключами, управляемыми по времени - SA1, SA2 и диодами VD1, VD2. Ключ SA1 замкнут во время действия положительной полуволны сетевого напряжения (0 – 10) мс, а ключ SA2 – во время действия отрицательной полуволны (10 – 20)мс. С помощью ключей SA3 – SA5 задается форма разрядного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические исследования подтверждены экспериментально на изготовленном генераторе импульсных токов. На рис. 8, 9, 10, 11 представлены характерные осциллограммы импульсов тока ГИТ.

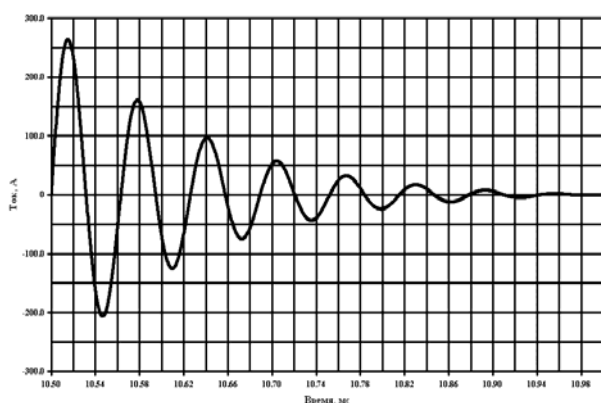


Рис. 8. Экспоненциально затухающая синусоида

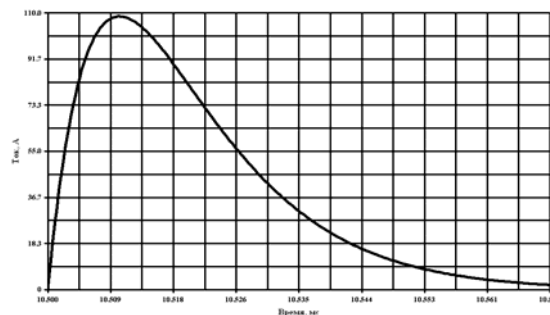


Рис. 9. Аperiodический импульс

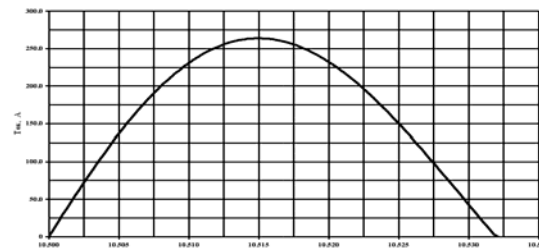


Рис. 10. Первая полуволна экспоненциально затухающей синусоиды

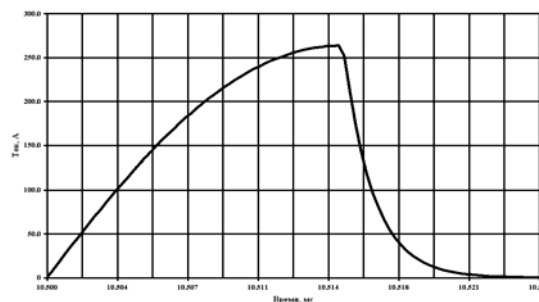


Рис. 11. Срезанная полуволна экспоненциально затухающей синусоиды

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Щеглов Б.А., Есин А.А. Раздача тонких трубчатых заготовок силами притяжения импульсного магнитного поля. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1971. – № 4. – С. 15 – 18.
- [2] Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. – Харьков: Вища шк., 1979, - 138 с.
- [3] Бондаренко А.Ю., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования. // Электротехніка і Електромеханіка. – 2007. - № 6. – С. 66 – 69.
- [4] Материалы сайта <http://www.irf.com>.
- [5] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 536с., ил.
- [5] Карлашук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Work Bench и ее применение. – М.: "Солон – Р", 2001. - 726 с.

Поступила 26.07.2007

Список авторів

Б		П	
Баранов Михаил Иванович	5, 60	Панченко Віктор Іванович	36
Борцов Александр Васильевич	63	Пархоменко Дмитро Ігорович	18
Бондар Роман Петрович	18	Петрушин Виктор Сергеевич	38
Богаенко Микола Володимирович	18	Попков Володимир Сергійович	18
Бранспиз Мария Юрьевна	21	Процина Зиновий Павлович	41
В		Р	
Выровец Сергей Валерьевич	15	Радимов Игорь Николаевич	41
Г		Рак Наталия Олеговна	49
Голенков Геннадій Михайлович	18	Рымша Виталий Викторович	41
Гребенюк Андрій Миколайович	36	С	
Гулый Михаил Викторович	41	Середа Александр Григорьевич	25
З		Сосков Анатолий Георгиевич	49
Загирняк Михаил Васильевич	21	Соскова Инна Алексеевна	49
К		Ставинский Андрей Андреевич	44
Каленик Борис Витальевич	38	Т	
Каплун Виктор Владимирович	30	Ткачук Василь Іванович	53
Каша Лідія Володимирівна	53	Ц	
Кириченко Марина Сергіївна	36	Ципленков Дмитро Володимирович	36
Л		Ч	
Лупиков Валерий Сергеевич	25	Чабан Андрій Васильович	57
Литвиненко Виктория Владимировна	25	Чан Тхи Тху Хьонг	41
М		Чепелюк Александр Александрович	15
Макаревич Светлана Сергеевна	30	Я	
Макогон Сергій Андрійович	18	Якимец Андрей Миронович	38
Мишин Владимир Иванович	30		

Abstracts

ELECTROENGINEERING: Prominent events and great names

Baranov M.I.

Lev Davidovich Landau – founder of Kharkov scientific school of theoretical physics and quantum condensed-state physics

A brief scientific-and-historical essay about creative development and the main scientific achievements in the field of theoretical physics

5 made by the outstanding theoretician-physicist of the 20th century Lev Davidovich Landau is given.

Key words – scientific-and-historical essay, theoretical physics, electrodynamics, quantum physics, nuclear physics, material, achievements, discoveries.

Electrical Mashines and Apparatus

Vyrovets S.V., Chepelyuk A.A.

Analysis of specific-gap-located ferromagnetic shunt resistors action on pulling forces in an electromagnet with a single-position magnetic catch

The paper analyzes action of an ferromagnetic shunt resistor on pulling force in an electromagnet with a single-position magnetic catch based on high-coercitivity permanent magnets, the shunt resistor located in the specific gap. Rational dimensions of the ferromagnetic shunt resistor are specified.

Key words – electromagnet with a single-position magnetic catch, ferromagnetic shunt resistor, action, analysis.

Golenkov G.M., Parkhomenko D.I., Makogon S.A., Bondar R.P., Bogaenko M.V., Popkov V.S.

Simulation of operation of a coaxial linear synchronous vibrator with magnet suspension

Operation of a coaxial linear synchronous vibrator with magnet suspension is simulated. Electromechanical parameters and characteristics of the vibrator are obtained for the control law of $U/f = const$. Calculation of the magnetic linkage is performed on the basis of solving the problem of electromagnetic field in the active zone of the vibrator and the magnet suspension.

Key words – coaxial linear synchronous vibrator with magnet suspension, operation, simulation.

Zagirnyak M.V., Branspiz M.Yu.

The basic equations of an e-type electromagnet synthesis problem

The basic equations for geometric, magnetic and electrical parameters of an E-type electromagnet are obtained. These equations allow solving a problem of the electromagnet synthesis.

Key words – electromagnet, geometric dimensions, magnetic circuit, synthesis problem.

Lupikov V.S., Sereda A.G., Litvinenko V.V.

A high-speed high voltage DC breaker

The paper describes modernization of a high-speed high voltage DC breaker designed for electric locomotive electrics protection in an emergency operational modes.

Key words – high-speed high voltage DC breaker, modernization, emergency operation, electric locomotive electrics protection.

15

Mishyn V.I., Kaplun V.V., Makarevych S.S.

An asynchronous electromechanical complex in an autonomous system

A generalized computing technique for calculating characteristics of an asynchronous electromechanical complex based on compensated asynchronous machines in an autonomous system is introduced, the technique satisfies any partial situations of joint operation of an asynchronous generator and an asynchronous motor.

Key words – asynchronous generator, asynchronous motor, autonomous system, asynchronous electromechanical complex.

Panchenko V.I., Tsyplenkov D.V., Grebenuk A.N., Kirichenko M.S.

18

An asynchronous motor with salient armature projections and hexaphase stator winding

A scheme of a stator winding with salient armature projections which eliminates deleterious effect of the highest (5th, 7th and other) field density harmonics is considered. The winding has a simple structure and provides a high repair capability of the asynchronous motor.

Key words – asynchronous motor, stator, salient armature projections.

Petrushin V.S., Yakimets A.M., Kalenik B.V.

21

Influence of magnetic system saturation and current displacement in the rotor winding on power characteristics of an adjustable-speed induction motor

Determination of equivalent circuit parameters taking into account magnetic system saturation and current displacement in the rotor winding provides more accurate calculation of power characteristics of an adjustable-speed induction motor.

Key words – adjustable-speed induction motor, saturation, current displacement, power characteristics.

25

Radimov I.N., Rimsha V.V., Guliy M.V., Prochina Z.P., Chan Txi Txu Chiong

Development of brushless DC motors with permanent magnets on the basis of a switched reluctance motor stator die

A feasibility of manufacturing brushless DC motors with permanent magnets on the basis of a switched reluctance motor stator die is considered.

Key words – brushless DC motor, switched reluctance motor, magnetic field, electromagnetic torque.

30

36

38

41

Stavinsky A.A.

Assignment and application features of special electrical machines

Analysis of specificity is executed, results of development are given, definition is formulated, advantages of application of special electrical machines are shown on an example of piston mechanisms.

Key words – **special electrical machine, classification, specificity, operation, application, waterproof compressor.**

Soskov A.G., Rak N.O., Soskova I.A.

Analysis of computing methods for semiconductor structure temperature in power semiconductor devices in under their operation in commutation semiconductor apparatus

Computing methods for calculating semiconductor structure temperature in power semiconductor devices in commutation semiconductor apparatus have been analyzed. An engineering technique for semiconductor structure temperature calculation is introduced. This technique allows calculating unsteady heat conditions of these devices under influence of short-term free-form power impulses.

Key words – **semiconductor structure temperature, engineering calculation technique, commutation semiconductor apparatus, unsteady heat condition, short-term power impulses.**

44

Tkachuk V.I., Kasha L.V.

Ways of electromagnetic moment pulsation reduction in a switched reluctance motor with a buffer of energy

A construction diagram of an electromechanical transducer and a principle electrical scheme of a transistor commutator of a switched reluctance motor (SRM) with series capacity storage are given. Research results of electromagnetic moment pulsations of the SRM are represented and ways of pulsation level reduction are introduced in this paper.

49

Key words – **buffer of energy, electrical schemes, switched reluctance motor.**

Chaban A.

Application of artificial neural networks for analysis of electromechanical systems

The paper introduces a neural network based method of artificial intelligence tools application to analysis of steady-state processes in electromechanical devices with distributed parameters. Training of a radial neural network as one of the basic procedures is carried out with mathematical modeling methods.

Key words – **electromechanical system, steady-state process, analysis, radial neural network, mathematical modeling.**

53

57

Electrical Engineering: Theory

Baranov M.I.

Analytical estimation of a wave electron package periodical structure displacement in a metallic conductor with alternative conduction current

On the basis of quantum physics and classical electrodynamics principles, an approximate rela-

60

tionship for estimation of longitudinal time displacement of de Broglie electron half-waves in a thin metallic conductor with alternative or bipolar pulse conduction current is derived.

Key words – **metallic conductor, alternative conduction current, displacement, periodical structure, wave electron package.**

High Electrical and Magnetic Field Engineering

Bortsov A.V.

A generator for physical simulation of pulsed electromagnetic fields

A pulse current generator for physical simulation of pulsed electromagnetic fields has been developed and manufactured. The latest achievements in the field of semiconductor engineering are used in designing the generator, computer simulation of electromagnetic processes in the generator power circuit applied. New pulse forms are obtained, namely, aperiodic pulse, a half-wave of harmonic oscillation, a sheared half-wave of harmonic oscillation. New pulse forms are of great interest in simulation of electromagnetic processes in the plants for magnetic pulse treatment of metals.

Key words – **pulse current generator, high-power high-voltage high-speed semiconductor switches, new pulse forms of discharge current.**

63

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ 2007 РОКУ

№1

Бурковский А.Н., Рыбалко О.А.	Определение зависимости допустимого количества реверсов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	5
Голенков Г.М., Бондар Р.П., Макогон С.А., Подольцев А.Д., Богаенко Н.В., Попков В.С.	Численный расчёт магнитного поля и основных характеристик электровибратора на основе коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами	8
Gurevich V.	Simple very high-speed overcurrent protection relay	13
Дёгтев В.Г., Бабушанов А.В., Лаврук И.С., Самойлов Г.А.	Синтез гомологических рядов трехфазных обмоток	17
Заболотный И.П., Гришанов С.А.	Метод управления динамическим режимом синхронного генератора с использованием фазовых траекторий движения ротора	21
Загирняк М.В., Загирняк В.Е., Невзлин Б.И., Киричков А.В.	Характеристики температурной защиты асинхронного двигателя при быстро нарастающих перегрузках	25
Клименко Б.В., Байда Е.И., Гречко А.М., Боев С.А.	О термическом действии токов коротких замыканий в электрических цепях средних напряжений, защищаемых вакуумными выключателями	30
Себко В.В.	Контроль четырех параметров ферромагнитных изделий на одной частоте зондирующего продольного магнитного поля ТВД	34
Чабан А.	А-модель турбогенератора у фазних координатах струмів	37
Чепелюк А.А.	Применение метода Монте-Карло для расчета проводимости рассеяния в двухстержневом электромагните клапанного типа	42
Шарабан Ю.В.	Способы повышения пусковых характеристик авиационных асинхронных двигателей	45
Боев В.М., Рогачев С.И.	Сверхпроводимость с точки зрения концепции "электротонического состояния" Фарадея	49
Канов Л.Н., Костюков В.В.	Метод моделирования нестационарных режимов электротехнических систем на основе их схемных коэффициентов	53
Баранов М.И.	Одномерная электротепловая задача для металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии	56
Беспрозванных А.В.	Анализ матрицы коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений при восстановлении частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь многожильных кабелей по результатам совокупных измерений	62
Дубовенко К.В.	Метод расчета вероятностных характеристик пробоя газовой изоляции в высоковольтной аппаратуре субмегавольтного диапазона	67
Петков А.А.	Формализация описания структур разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств	73

№2

Баранов М.И.	Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики и ядерной энергетики	5
Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С.	Исследование индукционно-динамического двигателя при наличии ускорительной и тормозной фаз рабочего процесса	13
Бурковский А.Н., Рыбалко О.А.	Сравнение нагрузочной способности закрытых обдуваемых асинхронных двигателей в повторно-кратковременных режимах S3, S4, S5	19
Gurevich V.	High Current Pulse Transducer for Metal-Oxide Surge Arresters	22
Клименко Б.В.	Міжнародний електротехнічний словник: українські перспективи	25
Король Е.Г.	Анализ методов моделирования магнитных характеристик электромагнитов для компенсации магнитного поля электрооборудования	31
Лущик В.Д., Дяченко В.В.	Удосконалення трифазних вентильних індукторних генераторів	35
Маляр А.В.	Математичне моделювання процесів в асинхронному двигуні штангової нафтовидобувної установки	38
Мишин В.И., Козырский В.В., Каплун В.В., Кулинич А.Н., Макаревич С.С.	Компенсированный асинхронный генератор для автономных систем электроснабжения	42
Себко В.В.	Методика оценки погрешностей совместного измерения магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и температуры ферромагнитного изделия контактным резистивно-индуктивным методом	48
Ткачук В.І., Біляковський І.Є. Копчак Б.Л.	Позиційний (слідкувальний) електропривод на базі вентильного реактивного двигуна з буфером енергії	52
Шарабан Ю.В., Финкельштейн В.Б.	Определение момента инерции присоединенного маховика, исключаящего влияние ускорения на измерение кривой моментов асинхронного двигателя	56
Шумилов Ю.А., Пономаренко В.К., Кузьмин В.В., Демидюк Б.М.	Цветовое "проявление": качественно новый уровень рентгенодиагностики	59
Ассуиров Д.А.	Исследование системы активного экранирования магнитного поля постоянных токов	63
Пентегов И.В., Красножон А.В.	Влияние параметров ферромагнитной среды на величину составляющих поверхностного импеданса	65
Пентегов И.В., Волков И.В., Приступа А.Л.	К расчету тесловских процессов при беспроводной передаче энергии	70
Милых В.И., Майстренко А.М.	Виртуальная реальность и принципы разработки виртуальной лаборатории трансформаторов и электрических машин	74
Толмачов С.Т., Гльченко О.В.	Електронна система тестування з теоретичної електротехніки	82

№3

Баранов М.И.	Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики и ядерной энергетики	5
Бібік О.В., Попович О.М.	Підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу в квазістатичних режимах роботи	12
Бранспиз М.Ю.	К постановке оптимизационной задачи для одновитковой обмотки	15
Васьковський Ю.М., Гайдено Ю.А., Нацик О.В.	Дослідження методами теорії поля характеристик асинхронних двигунів при несиметрії параметрів ротора	19
Жаворонков М.А., Ткаченко С.А.	Диагностика текущей работоспособности электромеханических коммутационных аппаратов	23
Заблодский Н.Н.	Взаимодействие шнекового электротепломеханического преобразователя и нагреточно-охлаждающей среды	25
Клименко Б.В.	Міжнародний електротехнічний словник: українські перспективи	29
Конохов Н.Н.	Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин	36
Мороз В.І.	Інтегральні рівняння в моделюванні керованих електромеханічних систем	39
Павленко Т.П.	Влияние активации на износ электрических контактов	44
Поляков М.А.	Нечеткий регулятор охлаждения силового масляного трансформатора на основе прогноза изменения возмущающих факторов	47
Попович О.М., Головань І.В.	Дослідження асинхронних двигунів з масивним ферромагнітним ротором при підвищеній частоті живлення	51
Розанов Ю.К., Крюков К.В.	Регулятор потока мощности с использованием фотоэлектрического преобразователя	55
Сибко В.В.	Исследование переходного процесса нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием при изменении температуры нагревателя по периодическому закону	57
Шумилов Ю.А., Пономаренко В.К., Кузьмин В.В., Демидюк Б.М.	Обеспечение надёжности электрогенераторов на АЭС, ГЭС и ТЭС	61
Шуруб Ю.В.	Покращення експлуатаційних властивостей трифазно-однофазних асинхронних електроприводів в пускових режимах	64
Бранспиз Ю.А.	Анализ мысленного опыта Эйнштейна по определению составляющей силы магнитного поля на ток в ферромагнитном проводнике	66
Горбачев М.Н.	Геометрическое моделирование периодических негармонических энергетических процессов в управляемых радиотехнических цепях и системах	69
Пелевин Д.Е.	Определение исходных данных для электромагнитных устройств управления магнитным полем в помещениях	72
Годжелло А.Г., Жаворонков М.А., Калашникова А.В., Нечаев Д.Н.	Создание универсального учебного стенда для исследования аппаратов низкого напряжения	77

№4

Байша О.І., Козлов В.В., Братківська К.О., Набокова О.В.	Розрахунок швидкостей масла в призматичних каналах високовольтного масляного трансформатора із циліндричними обмотками	5
Бранспиз Ю.А., Поляченко Е.Ю.	Применение метода конформных отображений для определения рациональной геометрии двухполюсных электромагнитов	7
Гречко М.В., Дяченко В.В.	Шляхи поліпшення питомих показників вентильних індукторних генераторів	9
Дубинець Л.В., Зорічев А.В., Карзова О.О., Маренич О.Л., Устименко Д.В.	Вимоги до швидкодії захисних апаратів в електричних колах рухомого складу залізниць	13
Жорняк Л.Б., Осинская В.И.	Исследование методов моделирования работы системы регулирования напряжения силового трансформатора с устройством РПН для повышения качества электроснабжения потребителей электроэнергии	15
Заблодский Н.Н., Овчаров А.А., Филатов М.А.	Экспериментальная оценка энергетических процессов в массивном роторе шнекового электротепломеханического преобразователя энергии	22
Клементьев А.В.	Исследование токов несимметричных коротких замыканий в бесконтактных совмещённых синхронных генераторах	25
Клименко Б.В.	Міжнародний електротехнічний словник: українські перспективи	28
Комісаренко О.І., Ламанов С.Л.	Вплив форми кривої спадання струму на енерговиділення при вимиканні навантаження	34
Кузьмин В.В., Шпатенко В.С.	К проблеме расчета силового воздействия магнитопровода на обмотки электрических машин	36
Лимонов Л.Г.	Об особенностях использования асинхронного электродвигателя для привода моталки	40
Пентегов И.В., Рымар С.В., Волков И.В., Ларченко Б.Б., M. Levin	Новые трехфазные автотрансформаторные фазосдвигающие устройства подавления высших гармоник тока	45
Плешков П.Г., Плешков С.П., Котыш А.И., Солдатенко В.П.	Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей на базе комплексной электроэнергетической системы с использованием возобновляемых источников энергии	50
Тетерко О.А.	Результати експлуатаційних випробувань відновлених електричних контактів контакторів ЕКГ-8Ж електровозів змінного струму	53
Баранов М.И., Носенко М.А.	Двумерная электротепловая задача для металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии	57
Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М.,	Использование импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газообразных отходов	64
Бржезицкий В.А., Маслюченко И.Н., Троценко Е.А., Хоминич В.И.	Экспериментальное исследование электрической прочности высоковольтного ввода с комбинированной изоляцией	66

Вороновский Г.К., Сергеев С.А., Старков К.А., Абашкина О.С.	Оценка предельно допустимой величины ожидаемого прироста нагрузки в городской распределительной сети 110 кВ, вызываемого ростом энерговооруженности быта	68
Петрушин В.С.	К 60-летию со дня рождения	72
№5		
Байда Е.И., Гапоненко Г.Н.	Моделирование процессов отключения токов короткого замыкания автоматическими выключателями	5
Голенков Г.М., Веремієнко А.В.	Оптимизация параметров линейного асинхронного двигателя с токопроводящим слоем на бегуне методом конечных элементов	9
Gurevich V.	A problem of power supply of microprocessor-based protective relays at emergency mode	12
Клименко Б.В.	Міжнародний електротехнічний словник: українські перспективи	16
Макогон С.А.	Трирівнева система керування віброзанурювачем з лінійним збуджувачем коливань	21
Панасенко М.В., Панасенко Н.М., Хворост В.Ю.	Енергозберігаючі сильноструміві високовольтні ключі і фазні модулі на їх основі	24
Павленко Т.П.	Аморфные сплавы и возможность их применения в блоках полупроводниковых расцепителей автоматических выключателей	30
Бондар О.І.	Електромагнітні процеси в нелінійному електрохімічному колі з трьома реактивними елементами при дії імпульсної вхідної напруги	34
Горкунов Б.М.	Сравнительный анализ метрологических характеристик амплитудно-фазовых методов вихретокового контроля ферромагнитных материалов	37
Пантелят М.Г., Шульженко Н.Г.	Использование векторного магнитного потенциала в конечноэлементном анализе нестационарных трехмерных электромагнитных полей в проводящих средах	42
Баранов М.И.	Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии	48
Беспрозванных А.В.	Сравнительный анализ поперечной структуры незаполненных и заполненных телефонных кабелей по результатам прямых измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь	61
Бондина Н.Н., Крамчанин Е.Г., Лютенко Л.А., Михайлов В.М.	Электродинамические усилия, действующие на цилиндрическую оболочку при колебательном разряде магнитно-импульсной установки	66
Бржезицкий В.А., Маслюченко И.Н., Троценко Е.А.	К расчету электрического поля ввода с газовой изоляцией	71
Герой Украины Вороновский Геннадий Кириллович		73
Загирняк М.В.	К 60-летию со дня рождения	74
Кравченко В.И.	К 60-летию со дня рождения	75
Пуйло	К 75-летию со дня рождения	76

№6

Байда Е.И.	Моделирование процессов отключения токов короткого замыкания автоматическими выключателями токоограничивающего исполнения	5
Болюх В.Ф., Болюх Е.Г.	Ударный электромеханический преобразователь индукционно-динамического типа с ускоряемым индуктором и неподвижной форсирующей обмоткой	9
Вырвец С.В., Чепелюк А.А.	Расчет магнитной системы с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов для вакуумных выключателей	15
Грищук Ю.С., Кузнецов А.И., Грищук С.Ю., Ржевский А.Н.	К тепловому расчету предохранителей с комбинированным наполнителем	20
Gurevich Vladimir	Problem with output relays used in microprocessor-based protection devices: what to do?	24
Загирняк М.В., Усатюк В.М., Подорожный С.В.	Расчет новой конструкции сепаратора для переработки металлургических шлаков	30
Клименко Б.В.	Міжнародний електротехнічний словник: українські перспективи	35
Клименко Б.В., Гречко А.М., Ересько А.В.	Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения	40
Король Е.Г.	Анализ методов моделирования петли гистерезиса ферромагнитных материалов	44
Лебедев В.А.	Оценка затрат энергии при механизированной дуговой сварке плавящимся электродом	48
Павленко Т.П.	Анализ состояния поверхности катода на основе статистической теории твердого тела	52
Терешин В.Н., Богданова Л.Е.	К вопросу о времени срабатывания автоматических выключателей в зоне токов перегрузки	56
Баранов М.И.	Эвристическое определение максимального числа электронных полувольт де бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости	59
Жемеров Г.Г., Ильина О.В.	Теория мощности Фризе и современные теории мощности	63
Бондаренко А.Ю., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А.	Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования	66
Кравченко В.И., Петков А.А.	Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии	70
Мішин В.І.	До 75-річчя з дня народження	76

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В НАУКОВО-ПРАКТИЧНОМУ ЖУРНАЛІ "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА"

Шумилов Ю.А., д.т.н., проф.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, НТУУ "КПІ", кафедра "Електромеханіка"
тел. (044) 241-76-38

Клименко Б.В., д.т.н., проф.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра "Електричні апарати"
тел. (057) 707-62-81, факс (057) 707-66-01, E-mail: eie@kpi.kharkov.ua

Текст анотацій українською мовою, до 5 рядків (для громадян України).

Текст анотацій на російській мові, до 5 рядків.

ВСТУП

У журналі публікуються результати досліджень і огляди у області електричних машин і апаратів, сильних магнітних полів і теоретичної електротехніки, що не публікувалися раніше, методичні матеріали по напрямках підготовки "Електротехніка" і "Електромеханіка", а також інформаційні матеріали за профілем журналу.

Пакет документів, що направляється в редакцію повинен містити:

1) у друкованому варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал (1 екз.) виконаний на аркушах паперу формату А4 густиною 80 - 90 г/м², віддрукований на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 300 dpi;

— акт експертизи з печаткою (для громадян України). Офіційний лист з проханням опублікувати статтю (для громадян зарубіжних країн);

— рецензія (підписується доктором наук і засвідчується печаткою);

— копія документа про оплату за публікацію.

2) в електронному варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал, виконаний у відповідності до даних вимог (без колонтитулів і нумерації сторінок);

— анотація англійською мовою (автори, назва статті, анотація, ключові слова);

— відомості про авторів (прізвище, ім'я, по-батькові повністю, дата народження, місце роботи, посада, основні напрями наукової діяльності).

Анотація і відомості про авторів виконуються у вигляді окремого документа Microsoft Word і з довільним форматуванням.

Оригінал статті або інформаційних матеріалів готується тільки з використанням редактора Microsoft Word однією з трьох мов: українською, російською або англійською.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТІ

Всі розділи документа повинні містити поля: зліва, справа, зверху – по 20 мм, знизу – 25 мм. Заповнення останньої сторінки повинне бути не менше 80%.

Заголовок статті містить:

— код УДК;

— назва статті (Times New Roman 12pt, жирний, розміщення по центру, заголовні букви, не допускаються перенесення);

— список авторів, вчений ступінь (при необхідності звання і посада), назва організації, поштова адреса, контактні телефони (факс, E-mail). Для авторів різних організацій список приводиться по даній вище формі; — анотації статті українською (обов'язково тільки для громадян України) і російською мовою, обсягом до 5 рядків кожна, оформляються шрифтом Times New Roman 9 pt, жирний, курсив.

Між елементами заголовку статті робиться інтервал в один рядок 10 pt.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Текст розміщується у двох колонках, відстань між якими 5 мм. Абзацні відступи (червоний рядок) – 7,5 мм. Текст набирається шрифтом Times New Roman 10 pt з одиночним міжрядковим інтервалом. Допускається розділення тексту на розділи. Назва розділу оформляється заголовними буквами і центрується, нумерація – не обов'язкова (розділи ВСТУП, ВИСНОВОК і ЛІТЕРАТУРА, якщо такі є, не нумеруються). Перед назвою розділу вставляється один порожній рядок.

Рисунки і широкі таблиці допускається розміщувати в одну колонку. Назва виконується шрифтом розміром 9 pt. Допускається використання рисунків і таблиць без назви: Рис. 1, Табл. 1.

Таблиця 1

Розміри полів тексту статті

Поле зліва	20 мм
Поле справа	20 мм
Поле зверху	20 мм
Поле знизу	25 мм

Рисунки розташовуються у окремих абзацах, з вирівнюванням по центру і оформляються як окремі об'єкти, виконуються в редакторі рисунків Microsoft Word або вставляються в текст статті у форматі bmp або jpg.

Розташування рисунка поверх тексту і застосування альбомної орієнтації не допускається.

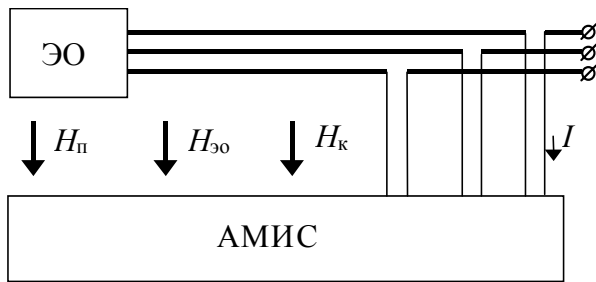


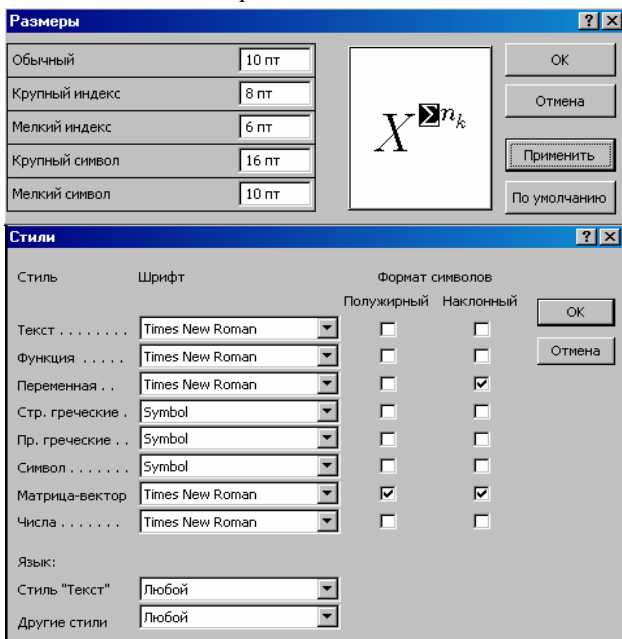
Рис.1. Функціональна схема пристрою

Математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів тільки в редакторі формул Microsoft Equation, розташовуються по центру і нумеруються в межах статті, номер притиснутий до правої сторони колонки. За формулою має слідувати розділовий знак, а якщо формула містить пояснення, то вони повинні починатися з нового абзацу із слова "де" без відступу

$$N = \frac{\tau_{u \max}}{T_k \text{ внутр}}, \quad (1)$$

де $\tau_{u \max}$ - ..., $T_k \text{ внутр}$ - ...

Настройки редактора формул для меню "Розмір" і "Стиль" символів представлені нижче:



Кириличні символи у формулах повинні бути виконані в стилі "Текст".

Щоб уникнути різного роду накладень символів у формулах не рекомендується застосовувати символ ділення /, букву ℓ , а також змінювати розмір об'єкту формули. Крім того, необхідно використовувати символ множення у вигляді крапки.

Великі вирази і рівняння необхідно записувати в декілька рядків

$$Y = \varphi_0(S_n) + \gamma_0 \cdot \int_{S=0}^{S_n} \varphi_0 \cdot \sin(S_n - S) \cdot dS + \gamma_0^2 \cdot \int_{S=0}^{S_n} P_0(S) \cdot \cos(S_n - S) \cdot dS. \quad (2)$$

Символи у формулах і в тексті статті повинні мати однакові зображення.

Перелік літератури розміщується в кінці тексту. Розмір шрифту - 9пт. Після відступу одного порожнього рядку (10пт) від основного тексту по центру колонки розташовують слово ЛІТЕРАТУРА. Нумерація джерел – у порядку посилань по тексту або в алфавітному порядку, номер поміщається у квадратних дужках з виступом.

ВИСНОВОК

Якщо Ви робите посилання на формули, рисунки, таблиці або літературу, необхідно використовувати наступні позначення: (1), (1) і (2), (1) – (4); рис. 1, рис. 1,а, рис. 1 і 2; табл. 1, табл. 1 і 2; [1], [1 – 3, 5].

ЛІТЕРАТУРА

- [1] P.V. Johns, "A symmetrical condensed node for the TLM method", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-35, Apr. 1997, pp. 370-377.
- [2] Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 272 с.
- [3] Лавров В.Я. Численно-аналитический метод расчета помехонесущих магнитных полей // *Техн. электродинамика*. – 1983. - № 61. - С. 18-21.
- [4] Пат. 14813 А Україна. МКИ G 01 R 33/24. Спосіб визначення залишкової та індукованої складових компонента магнітної індукції статичного зовнішнього магнітного поля ферромагнітного виробу / А.В. Єрисов, В.С. Лупіков, В.Ю. Розов та ін.— №95125251; Заявлено 12.12.95; Опубл. 30.06.97. Бюл. №3. — 6 с.
- [5] Минкевич А.В. Физическое пространство — время и релятивистская космология // *Тез. докл. 10-й Росссийск. Гравитац. конф. "Теоретические и экспериментальные проблемы общей теории относительности и гравитации"* (г. Владимир, 20-27 июня 1999 г.). — М.: РГО, 1999. — с. 84.

В кінці статті, через інтервал в 1-2 рядки розміром 10пт, мовою оригіналу вказують дату надходження статті в редакцію журналу (розмір 9пт, курсив, розташування по правому краю). Наприклад:

Поступила 02.01.2008

або

Надійшла 02.01.2008

Матеріали приймаються за адресою:

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

Електронні варіанти матеріалів по E-mail: kbv@kpi.kharkov.ua eie@kpi.kharkov.ua

Довідки за телефонами: (057) 707-62-81 Клименко Борис Володимирович, Злуніцина Наталя Ростиславівна

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Електротехніка і Електромеханіка
Электротехника и Электромеханика
Electrical engineering & Electromechanics
2008'1

ISBN 966-593-254-3



Технічне редагування:

Смельянов Вадим Леонідович

т. (057)707-69-76

E-mail: evl@kpi.kharkov.ua

Секретар редакції:

Злуніцина Наталя Ростиславівна

т. (057)707-62-81

E-mail: seb@kpi.kharkov.ua

Підписано до друку 01.02.2008 р.

Формат 60 × 90 1/8. Папір Prima Copy

Друк - офсетний. Ум. друк. арк. 9,75.

Наклад 300 прим. 1-й завод - 118. Зам. № 161. Ціна договірна.

НТУ "ХПІ". 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

КП Друкарня №13. 61002, Харків, вул. Артема, 44
