

ISSN 0013-5380

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1998

11

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Секция теоретических основ электротехники, преобразовательной техники, электротехнических материалов

Бутырин П.А. (Объединенный институт высоких температур РАН), председатель секции, Булатов О.Г. (Московский энергетический институт), Козлов В.Н. (С.-Петербургский государственный технический университет), Лагарьков А.Н. (Объединенный институт высоких температур РАН), Макашкин Б.Д., ответственный секретарь редакции, Миронов В.Г. (Московский энергетический институт), Розанов Ю.К. (Московский энергетический институт), Чечурин В.Л. (С.-Петербургский государственный технический университет).

Научный редактор — Макашкин Б.Д.

Секция электроэнергетики

Строев В.А., главный редактор, председатель секции (Московский энергетический институт), Дьяков А.Ф. (Корпорация «Единый электроэнергетический комплекс РФ»), Железко Ю.С. (Научно-исследовательский институт электроэнергетики), Ишкин В.Х. (РАО «ЕЭС России»), Кощеев Л.А. (Научно-исследовательский институт постоянного тока), Мамиконянц Л.Г. (Научно-исследовательский институт электроэнергетики), Никитин О.А. (РАО «ЕЭС России»), Семенов В.А. (ЦДУ ЕЭС России).

Научный редактор — Кудинова Л.С.

Секция техники высоких напряжений, электрических аппаратов, трансформаторов

Ларионов В.П., председатель секции (Московский энергетический институт), Александров Г.Н. (С.-Петербургский государственный технический университет), Белкин Г.С. (Всероссийский электротехнический институт), Лоханин А.К. (Всероссийский электротехнический институт), Митькин Ю.А. (Ивановская государственная энергетическая академия).

Научный редактор — Кудинова Л.С.

Секция электрических машин

Иванов-Смоленский А.В., председатель секции (Московский энергетический институт), Бут Д.А. (Московский государственный авиационный институт), Данилевич Я.Б. (Отдел (институт) электроэнергетических проблем РАН), Евсеев Б.Н., заместитель главного редактора журнала, Шакарян Ю.Г. (Научно-исследовательский институт электроэнергетики).

Научный редактор — Евсеев Б.Н.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛУЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Отделение физико-технических проблем энергетики),
ФЕДЕРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ**СОДЕРЖАНИЕ**

Джангиров В.А., Антименко Ю.Л., Баринов В.А., Маневич А.С. Современное состояние и перспективы развития электроэнергетики СНГ	2 ✓
Никитин А.И. Электрический конденсатор как элемент энергетического ядра шаровой молнии	14
Попов В.М. Потенциальная помехоустойчивость устройств защитного отключения, реагирующих на гармонический сигнал	24
Пульников А.А., Пластун А.Т., Денисенко В.И. Исследование установившихся режимов работы синхронного двигателя с совмещенным индукторным возбуждением методом проводимостей зубцовых контуров	24
Мартынов В.А., Лабутин А.А. Математическая модель асинхронного явнополюсного конденсаторного двигателя на основе метода зубцовых контуров	28
Лихоманов А.М., Дмитриев Б.Ф., Панин С.Ю., Писарев А.Ю. Синтез взаимосвязанных систем электропривода на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики	37 ✓
Розанов В.А. Индуктивное влияние на линии связи электрической тяговой сети с продольными отсасывающими трансформаторами	44
Казанцев В.П., Лысенко Е.А. Вариационные оценки в электростатике. Принцип Гаусса, эквивалентные заряды и мультиполи	53
Рудаков М.И. Расчет электрического поля высокочастотных сварочных установок для оценки облучаемости персонала	57
Зыкин Ф.А., Казаков М.К. Переносной цифровой измеритель больших постоянных токов	62 ✓

ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Хасанов Б.Г. Два открытия, сделанные в Петербурге	71
---	----

ХРОНИКА

Камо Серопович Демирчян (К 70-летию со дня рождения)	74
Иван Филиппович Кузнецов (К 70-летию со дня рождения)	76
Виктор Иванович Попов (К 60-летию со дня рождения)	77
Лев Николаевич Макаров (К 60-летию со дня рождения)	78

CONTENTS

V.A. Dzhangirov, Yu.L. Antimenko, V.A. Barinov and A.S. Manevich, Present State and Prospects of Electric Power Engineering Development of CIS Countries	2
A.I. Nikitin, Electric Capacitor as a Ball Lightning of Energy Nucleus Element	14
V.M. Popov, Potential Noise Immunity of Protection Cut-Off Devices	24
A.A. Pul'nikov, A.T. Plastun and V.I. Denisenko, Investigation of Steady-State Operating Conditions of a Synchronous Motor with Combined Inductor Exciter Using a Teeth Conductivity Method	28
V.A. Martynov and A.A. Labutin, A Mathematical Model of a Salient-Pole Induction Capacitor Motor, Based on Tooth Circuit Method	37
A.M. Likhomanov, B.F. Dmitriyev, S.Yu. Panin and A.Yu. Pisarev, A Synthesis of Electric Drive Interconnected Systems on the Basis of a Frequency Approach to Solution of Inverse Dynamics Problems	44
V.A. Rozanov, Inductive Influence of Electric Traction Network with Longitudinal Bust Transformers on Communication Lines	53
V.P. Kazantsev and Ye.A. Lysenko, Variation Estimates in Electrostatics. The Gaussian Principle, Equivalent Charges and Multipoles	57
M.L. Rudakov, Calculating Electric Field of High-Frequency Welding Installations for Estimating Irradiation of Personnel	62
F.A. Zykin and M.K. Kazakov, Portable Digital Meter of Great Direct Currents	67

From the HISTORY of ELECTRICAL ENGINEERING

B.G. Khasapov, Two Discoveries Made in Petersburg	71
---	----

CHRONICLE

Kamo Seropovich Demirchyan (to Mark the 70th Anniversary)	74
Ivan Filippovich Kuznetsov (to Mark the 70th Anniversary)	76
Viktor Ivanovich Popov (to Mark the 60th Anniversary)	77
Lev Nikolayevich Makarov (to Mark the 60th Anniversary)	78

Современное состояние и перспективы развития электроэнергетики СНГ

ДЖАНГИРОВ В.А., АНТИМЕНКО Ю.Л., БАРИНОВ В.А., МАНЕВИЧ А.С.

Дана характеристика происшедших изменений в электроэнергетике стран СНГ за последние годы. Рассмотрены основные проблемы и перспективы развития электроэнергетики государств Содружества.

Ключевые слова: электроэнергетика, развитие, СНГ

A characteristic of changes, which took place in electric power engineering of CIS countries during the last years is given. The main problems and prospects of its development are considered.

Key words: electric power engineering, CIS, development

На территории бывшего СССР к концу 80-х годов был создан мощный эффективно работающий электроэнергетический комплекс страны, основой которого была Единая энергосистема — ЕЭС СССР, работавшая параллельно с энергосистемами стран Восточной Европы и Монголии в составе энергообъединения стран-членов СЭВ «Мир».

Раздел общесоюзной собственности между новыми независимыми государствами, бывшими республиками СССР, и происходящие процессы приватизации и дерегулирования в этих странах привели к принципиально новому экономическому базису, характеризующемуся образованием в отрасли многочисленных собственников энергетических объектов, работающих совместно. В этих новых условиях важное значение приобретают вопросы обеспечения эффективной совместной работы и устойчивого развития объединенных энергосистем стран СНГ.

Характеристика происшедших изменений и современного состояния электроэнергетики стран СНГ. Электроэнергетический потенциал России и других республик, входивших в состав СССР, был в основном создан за последние 35—40 лет, предшествовавших разделению СССР на независимые государства. Развитие электроэнергетики в эти годы шло опережающими темпами. С 1955 по 1990 гг. производство электроэнергии выросло более чем в 10 раз, в то время как произведенный национальный доход увеличился в 6,2 раза. Высокая эффективность производства, транспорта и распределения электроэнергии была достигнута благодаря реализации ряда основополагающих стратегических направлений развития электроэнергетики страны, к которым относились:

объединение энергосистем на параллельную работу и создание уникальной Единой энергосистемы страны, которая в конце 80-х годов стала крупнейшим централизованно управляемым энергообъединением в мире с установленной мощностью около 300 млн кВт;

ввод большого числа мощных высокоэффективных тепловых, гидравлических и атомных электростанций;

создание эффективной централизованной иерархической системы планирования развития и управления функционированием Единой энергосистемы, позволяющей решать весь комплекс задач, связанных с ее развитием и функционированием.

Установленная мощность электростанций страны увеличилась с 37,2 млн кВт в 1955 г. до 344 млн кВт в 1990 г. Протяженность электрических сетей напряжением 35 кВ и выше возросла с 51,5 до 1025 тыс. км, в том числе напряжением 220 кВ и выше — с 5,7 до 222 тыс. км. Удельная численность промышленно-производственного персонала на 1 МВт установленной мощности последовательно снижалась с 11 чел./МВт в 1950 г. до 2,85 чел./МВт в 1990 г., а удельные расходы условного топлива на производство электроэнергии уменьшались с 590 г/кВт·ч в 1950 г. до 325,8 г/кВт·ч в 1990 г.

В табл. 1 и 2 приведены данные по росту установленной мощности и производства электроэнергии на электростанциях СССР и в союзных республиках в период с 1955 по 1990 г. [1].

Общий экономический эффект от создания ЕЭС в сравнении с изолированной работой входящих в нее энергосистем характеризовался снижением капитальных вложений в электроэнергетику на сумму свыше 2 млрд руб. (в ценах 1984 г.) и уменьшением эксплуатационных расходов примерно на 1 млрд руб. Выигрыш в снижении суммарной установленной мощности электростанций составлял около 15 млн кВт. Несмотря на то, что требования в отношении резервов генерирующей мощности и надежности к основным электрическим сетям были несколько ниже аналогичных требований в энергообъединениях западных стран, благодаря хорошо организованному управлению обеспечивалась высокая надежность электроснабжения потребителей. Не было крупных системных аварий с по-

гашением большого числа потребителей, какие имели место в США, Канаде, Франции, Швеции, Бельгии.

Таблица 1

Год	Установленная мощность, млн кВт				Производство электроэнергии млрд/кВт·ч			
	Всего	ТЭС	ГЭС	АЭС	Всего	ТЭС	ГЭС	АЭС
1955	37,2	<u>31,2</u> 83,9	<u>6,0</u> 16,1	—	170,2	<u>147,1</u> 86,4	<u>23,1</u> 13,6	—
1960	66,7	<u>51,9</u> 77,8	<u>14,8</u> 22,2	—	292,3	<u>241,4</u> 82,6	<u>50,9</u> 17,4	—
1965	115,0	<u>92,8</u> 80,7	<u>22,2</u> 19,3	—	506,7	<u>425,2</u> 83,9	<u>81,5</u> 16,1	—
1970	166,1	<u>133,8</u> 80,5	<u>31,4</u> 18,9	<u>0,9</u> 0,6	740,9	<u>612,8</u> 82,7	<u>124,4</u> 16,8	<u>3,7</u> 0,5
1975	217,5	<u>172,1</u> 79,2	<u>40,5</u> 18,6	<u>4,9</u> 2,2	1038,6	<u>892,4</u> 85,9	<u>126,0</u> 12,1	<u>20,2</u> 2,0
1980	266,7	<u>201,9</u> 75,7	<u>52,3</u> 19,6	<u>12,5</u> 4,7	1293,9	<u>1037,1</u> 80,2	<u>183,9</u> 14,2	<u>72,9</u> 5,6
1985	315,1	<u>225,1</u> 71,4	<u>61,7</u> 19,6	<u>28,3</u> 9,0	1544,2	<u>1162,3</u> 75,3	<u>214,5</u> 13,9	<u>167,4</u> 10,8
1990	344,0	<u>241,0</u> 70,1	<u>65,0</u> 18,9	<u>38,0</u> 11,0	1726,0	<u>1281,0</u> 74,2	<u>233,0</u> 13,5	<u>212,0</u> 12,3

Примечание. Число в знаменателе — значение в %.

Таблица 2

Республика	Производство электроэнергии по годам, млрд кВт·ч							
	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990
РСФСР	115,9	197,0	333,0	470,2	639,9	805,0	962,0	1082,0
Украина	30,1	53,9	94,6	137,6	194,6	236,0	272,0	298,5
Белоруссия	1,9	3,6	8,4	15,1	26,7	34,1	33,2	39,5
Узбекистан	3,9	5,9	11,5	18,3	33,6	33,9	47,9	56,3
Казахстан	5,7	10,5	19,2	34,8	52,5	61,5	81,3	87,4
Грузия	2,0	3,7	6,0	9,0	11,6	14,7	14,4	14,2
Азербайджан	4,6	6,6	10,4	12,0	14,7	15,0	20,7	23,2
Литва	0,6	1,1	3,9	7,4	9,0	11,7	21,0	28,4
Молдавия	0,3	0,7	3,1	7,6	13,7	15,6	16,8	15,7
Латвия	0,9	1,7	1,5	2,7	2,9	4,7	5,0	6,6
Киргизия	0,5	0,9	2,3	3,5	4,4	9,2	10,5	13,4
Таджикистан	0,3	1,3	1,6	3,2	4,7	13,6	15,7	18,1
Армения	2,2	2,7	2,9	6,1	9,2	13,5	14,9	10,4
Туркмения	0,4	0,8	1,4	1,8	4,5	6,7	11,0	14,6
Эстония	0,9	2,0	7,1	11,6	16,7	18,9	17,8	17,2

Значительным достижением этого периода развития электроэнергетики было объединение и организация параллельной работы энергосистем стран-членов СЭВ в составе объединенной энергосистемы «Мир», установленная мощность которой в конце 80-х годов превысила 400 млн кВт и которая была крупнейшим энергообъединением на Европейском континенте.

В 1991 г. электроэнергетика на территории

СССР продолжала функционировать как единый централизованно управляемый комплекс. Однако изменения политических и экономических условий в стране начали оказывать негативное влияние на ее развитие и функционирование. По сравнению с 1990 г. произошло снижение выработки электроэнергии на ТЭС на 3,3%, выработка на ГЭС и АЭС практически не изменилась. В 1991 г. ухудшились экономические показатели работы отрасли. Удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию составил по отрасли 327,9 г/кВт·ч и увеличился по сравнению с 1990 годом на 2,1 г/кВт·ч. Потери в электрических сетях увеличились в 1991 г. до 8,98% против 8,69% в 1990 г. Ухудшились также показатели качества поддержания частоты, которые существенно были улучшены в 1988—1990 гг. Снизились поставки электроэнергии из ЕЭС в соседние страны до 21,5 млрд кВт·ч.

Образование независимых государств на территории СССР и раздел электроэнергетической собственности между ними привели к коренному изменению структуры управления электроэнергетикой на территории бывшего СССР. В независимых государствах были образованы собственные органы управления и самостоятельные субъекты хозяйствования в электроэнергетике, которые стали планировать развитие и осуществлять управление функционированием энергосистем этих государств.

Разрушение системы централизованного иерархического управления обусловило необходимость перехода от централизованного управления к скоординированному управлению планированием и функционированием электроэнергетики государств Содружества с тем, чтобы исключить разрушительные последствия неуправляемого процесса распада единой системы и создать благоприятные условия для дальнейшего успешного развития всех звеньев этой системы.

В целях координации управления развитием и функционированием объединенных энергосистем стран СНГ 11 государств — членов СНГ заключили 14 февраля 1992 г. соглашение «О координации межгосударственных отношений в области электроэнергетики Содружества Независимых Государств». В соответствии с этим соглашением был создан Электроэнергетический совет из числа первых руководителей электроэнергетических отраслей СНГ и его постоянно действующий рабочий орган — Исполнительный комитет. Позднее к этому соглашению присоединилась Грузия. Этим было положено начало формированию Энергообъединения стран Содружества (ЭСНГ).

В настоящее время внутри стран СНГ проводятся различные преобразования электроэнер-

гетического сектора. Существенные изменения в этой области в соответствии с указами Президента России произошли в Российской Федерации. В декабре 1992 г. было зарегистрировано Российское акционерное общество энергетики и электрификации — (РАО) «ЕЭС России». В его уставной капитал переданы из районных энергосистем крупные электростанции (тепловые — мощностью 1000 МВт и более, гидравлические — 300 МВт и более), магистральные высоковольтные линии электропередачи, формирующие Единую энергосистему Российской Федерации, Центральное и региональные диспетчерские управления, научно-исследовательские и проектные организации, часть акций каждого из 72 региональных акционерных обществ (АО-энерго), образованных на базе районных энергосистем.

В других странах СНГ процесс реформирования отношений собственности и формирования рыночных отношений в электроэнергетике находится в разной степени развития. Наиболее продвинулась в вопросах реформирования форм собственности в электроэнергетике вслед за Российской Федерацией Украина, где в соответствии с указами Президента Украины создан энергорынок, охватывающий всю территорию этой страны.

Существенные изменения произошли в Казахстане, где ряд объектов электроэнергетики стал принадлежать иностранным компаниям из дальнего зарубежья. В Казахстане функции управления сетями высокого напряжения, закупки электроэнергии у производителей и продажи ее потребителям, диспетчеризации и решения ряда других вопросов возложены на Казахстанскую компанию по управлению электрическими сетями (KEGOC).

В Молдове разработаны и переданы в парламент проекты реорганизации и приватизации двух из четырех основных государственных энергетических организаций. Проведены структурные преобразования в электроэнергетике Армении. Проводятся преобразования в электроэнергетике Грузии.

В Кыргызстане электроснабжение потребителей осуществляет Акционерное общество «Кыргызэнерго», в Таджикистане — государственная акционерная холдинговая компания «Барки Тоҷик», в Туркмении — государственная энерготехнологическая корпорация «Кувват». В Узбекистане управление электроэнергетической отраслью осуществляется Министерством энергетики и электрификации.

Таким образом, наиболее принципиальные изменения в электроэнергетике на территории бывшего СССР за последние годы связаны с образованием как на межгосударственном, так и

на внутригосударственных уровнях многих собственников энергетических объектов, генерирующие источники которых работали параллельно в составе ЕЭС СССР и продолжают работать или сохранили возможность параллельной работы в составе ЭСНГ. Эти изменения обуславливают необходимость создания новых эффективных механизмов совместного функционирования энергетических объектов, расположенных на территории бывшего СССР и принадлежащих различным собственникам. Отсутствие достаточно эффективных механизмов не позволяет реализовать в полной мере преимущества совместной работы энергосистем государств Содружества и уменьшить негативные влияния экономического кризиса в странах СНГ на электроэнергетику.

После распада СССР государства Содружества стали проводить политику развития электроэнергетики своих стран путем дорогостоящего строительства собственных электростанций, хотя это экономически во многих случаях неоправданно и может привести в конечном итоге к росту стоимости электроэнергии и, как следствие, к увеличению стоимости товаров и услуг, снижению конкурентоспособности товаров, производимых в странах СНГ, и снижению уровня жизни населения.

За последние годы в электроэнергетике стран СНГ в значительной степени возрос и продолжает быстрыми темпами увеличиваться объем устаревшего оборудования, выработавшего свой проектный ресурс и требующего замены, модернизации и реконструкции. Дефицит инвестиций не позволяет осуществлять в необходимом объеме техническое перевооружение объектов электроэнергетики, что может стать в будущем сдерживающим фактором в подъеме экономики стран СНГ.

Крайне негативное влияние на развитие и функционирование электроэнергетики стран СНГ оказывают неплатежи за отпущенную электроэнергию, которые имеют место как на межгосударственном, так и внутригосударственных уровнях.

Все это приводит к существенному снижению эффективности функционирования энергосистем стран СНГ. Это, в частности, выражается в ухудшении показателей надежности, качества поддержания частоты и напряжения, увеличении потерь энергии в электрических сетях, увеличении расхода топлива на электростанциях и др.

В ноябре 1993 г. из-за большого дефицита мощности на Украине был вынужденно осуществлен переход на раздельную работу Единой энергосистемы России и ОЭС Украины, что привело впоследствии к раздельной работе с остальными энергосистемами стран-участниц ЦДУ

в Праге, и энергообъединение «Мир» разделилось на несколько частей. И хотя затем параллельная работа Единой энергосистемы России и ОЭС Украины была восстановлена, дезинтеграционные процессы в рамках энергообъединения «Мир» привели к тому, что вначале энергосистема Восточной части Германии VEAG в сентябре 1995 г. присоединилась на параллельную работу к энергообъединению стран Западной Европы UCPTЕ, а в октябре 1995 г. к UCPTЕ присоединилось энергообъединение CENTREL, в которое входят энергосистемы Польши, Венгрии, Чехии и Словакии. В результате сооруженные совместными усилиями ряда стран первые и пока единственные в Европе межгосударственные линии электропередачи напряжением 750 кВ, соединявшие ЕЭС СССР со странами Восточной Европы, суммарной протяженностью более 2000 км оказались выведенными из работы.

Из-за нарушения традиционно сложившихся в ЕЭС принципов координации и управления производством и распределением электроэнергии в границах СНГ, неспособности отдельных энергосистем обеспечить поддержание частоты в требуемых диапазонах произошло прекращение параллельной работы между большинством энергосистем государств Содружества. В результате существенно сократилось использование преимуществ параллельной работы энергосистем, что привело к значительному снижению эффективности работы некогда процветавшей отрасли и к крупным экономическим потерям. В наиболее тяжелый осенне-зимний период 1996—1997 гг. в границах государств Содружества функционировало более 10 отдельных изолированно работающих энергообъединений, энергорайонов и отдельных энергосистем:

объединение большей части энергосистем России, Белоруссии и работающие параллельно с ними энергосистемы государств Балтии;

объединение энергосистем Сибири (кроме Омской энергосистемы, работающей параллельно с ОЭС Урала), а также работающая параллельно с ним энергосистема Монголии;

объединение энергосистем Украины и Молдавии, а также связанная с ними энергосистема Болгарии;

энергосистема Армении;

энергосистема Азербайджана, связанная с Дагестанской энергосистемой России;

энергосистема Грузии, периодически работающая параллельно с ЕЭС России, а также с энергосистемой Азербайджана и выделенным районом энергосистемы Турции;

энергосистема Нахичеванского района Азербайджана, получающая электроэнергию от энергосистем Ирана и Турции;

западные энергосистемы Казахстана, периодически работающие параллельно с ОЭС Урала и ОЭС Средней Волги;

энергосистемы Северного Казахстана, распавшиеся на четыре изолированные части;

ОЭС Центральной Азии, включающая энергосистемы Казахстана.

В этот же период имели место крупные системные аварии, которых, как отмечалось ранее, не было за все время существования ЕЭС СССР. Наиболее крупная авария произошла в Казахстане в 1996 г.

Электроэнергетический Совет СНГ и его Исполнительный комитет уделяют большое внимание восстановлению параллельной работы энергосистем государств Содружества. В августе 1997 г. после ремонта была введена в работу межгосударственная линия электропередачи «Кавказиони» (за прошедшее время имели место отдельные отключения этой ЛЭП), связывающая энергосистемы России и Грузии, что позволило организовать параллельную работу ЕЭС России и энергосистем Азербайджана, Армении и Грузии. Это повысило надежность и экономичность энергоснабжения региона и позволило существенно увеличить экспорт электрической энергии и мощности из государств Содружества в Турцию. В апреле 1998 г. восстановлена параллельная работа ЕЭС России и ОЭС Украины. В результате совместно работает большая часть энергосистем государств Содружества (Азербайджана, Армении, Беларуси, Грузии, Молдовы, России и Украины) и энергосистемы государств Балтии.

В настоящее время ведется работа по включению на постоянную параллельную работу с ЕЭС России Объединенной энергосистемы Казахстана.

На начало 1998 г. установленная мощность электростанций государств Содружества составила 315 млн кВт. В структуре генерирующих мощностей в целом по странам СНГ преобладают ТЭС, доля которых составляет около 69%, в их числе доля ТЭЦ — 29%. Доля ГЭС и АЭС существенно ниже — соответственно 20 и 11%, но в условиях дефицита топлива их значение в обеспечении электрической энергией экономики и населения отдельных государств Содружества достаточно велико.

В связи с перестройкой экономики и общим спадом промышленного производства в государствах Содружества электропотребление снижалось. Наибольшее снижение имело место в промышленности, а также в строительстве и на транспорте. В то же время наблюдалось увеличение потребления электроэнергии в коммунально-бытовом секторе. Суммарное потребление электроэнергии в целом по государствам Содружества в 1997 г. стабилизировалось и составило чуть

более 1200 млрд кВт·ч.

Существенно снизилось душевое потребление электроэнергии: до 4200 кВт·ч в целом по СНГ. Особенно заметное снижение душевого потребления электроэнергии имело место в России с 7230 кВт·ч в 1990 г. до 5500 кВт·ч (или на 24%) и в Казахстане, соответственно с 6235 до 4110 кВт·ч (или на 34%). В большинстве государств Содружества сохраняются высокие темпы прироста населения, что дополнительно способствует снижению душевого потребления. Из государств Содружества рост душевого потребления электроэнергии произошел только в Кыргызстане.

Пропорционально снижению потребления электроэнергии в государствах Содружества сократилось и производство электроэнергии, которое в 1997 г. в целом по СНГ составило около 1190 млрд кВт·ч, что на 28% меньше, чем в 1990 г.

В табл. 3 показано производство электроэнергии с странах СНГ в 1990–1997 годах.

Таблица 3

Республика	Производство электроэнергии в государствах Содружества в период 1990–1997 гг., млрд кВт·ч						
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Азербайджан	23,3	19,7	19,0	17,5	15,8	17,0	16,7
Армения	9,6	9,0	6,3	5,7	5,5	6,2	6,2
Беларусь	38,6	37,5	33,4	31,4	24,9	23,7	25,7
Грузия	13,4	11,5	10,1	7,0	7,0	7,2	7,2
Казахстан	86,0	83,3	74,5	64,0	63,2	58,9	52,2
Кыргызстан	14,1	12,0	11,2	12,7	12,3	13,7	12,6
Молдова	13,2	11,2	10,3	8,3	6,2	6,2	5,3
Россия	1068,2	1008,5	956,6	876,0	860,0	847,2	834,0
Таджикистан	17,5	16,8	17,7	17,0	14,8	15,0	14,0
Туркменистан	14,9	13,1	12,6	10,5	9,8	10,1	9,4
Узбекистан	54,1	50,9	49,1	47,7	47,4	45,4	46,7
Украина	278,6	252,6	228,3	201,5	190,3	181,7	177,0
Итого	1631,5	1526,1	1429,1	1299,3	1257,2	1232,3	1207,0

В структуре топливоснабжения электростанций более 56% составляет газ, около 29% — уголь, мазут — 15%. Высокая доля газа в структуре используемого на электростанциях топлива открывает перспективу для модернизации объектов электроэнергетики на основе широкого внедрения ПГУ и ГТУ с утилизацией тепла.

Таким образом, одной из первостепенных задач в электроэнергетике стран на территории бывшего СССР является создание эффективных механизмов совместной работы различных собственников энергетических объектов, которые бы обеспечивали выгоду для всех участников совместной работы, как в рамках национальных

энергосистем, так и ЭСНГ в целом. Воссоздание на этой основе эффективно работающего единого энергообъединения на территории бывшего СССР имеет ключевое стратегическое значение для будущего развития электроэнергетики и может стать одним из важнейших факторов ускорения интеграционного процесса стран СНГ.

Существующие запасы высокоэффективных энергетических ресурсов позволяют государствам Содружества в обозримом будущем не только полностью обеспечить свои потребности во всех видах топлива, но и наращивать их экспорт.

Государства Содружества в целом обладают достаточным потенциалом в области электроэнергетики, чтобы на основе углубления интеграции решить стоящие перед отраслью проблемы, обеспечить надежное электроснабжение населения и промышленности, способствовать подъему всей экономики.

Перспективы развития электроэнергетики. Объекты электроэнергетики большинства стран СНГ в последние годы эксплуатируются практически с неизменной или несколько снижающейся нагрузкой. Фактическое отсутствие роста потребления электроэнергии в сочетании с экономическими трудностями не ставят остро перед руководящими органами стран СНГ в области электроэнергетики вопросы ввода новых генерирующих мощностей. Однако, как показывает анализ, уже через 7–10 лет производство электроэнергии в большинстве государств Содружества достигнет или даже превысит уровень 1990 г. (см. табл. 2 и 4). К этому периоду значительная часть ныне действующего электроэнергетического оборудования полностью выработает свой ресурс, поэтому уже сегодня актуальна задача обеспечения финансирования развития электроэнергетики и замена выбывающего оборудования.

Таблица 4

Республика	Перспектива производства электроэнергии, млрд кВт·ч (min/max)	
	2000 г.	2010 г.
Азербайджан	20/22	27/31
Армения	10/10	12/13
Беларусь	28/29	40/45
Грузия	6/7	12/15
Казахстан	78/86	100/119
Кыргызстан	13/13	15/17
Молдова	9/9	8/11
Россия	840/860	1040/1240
Таджикистан	18/19	20/23
Туркменистан	14/17	21/27
Узбекистан	47/50	57/60
Украина	230/240	256/270
Итого	1298/1352	1608/1871

Происшедшие за последние годы изменения привели к созданию в государствах Содружества нового экономического базиса, обуславливающего новые условия развития сотрудничества этих стран в области создания новых и реконструкции действующих объектов электроэнергетики. Дополнительные возможности расширения сотрудничества открыло подписание Европейской Энергетической Хартии и Договора к ней, а также принятие в Совет Европы ряда государств Содружества.

Важнейшими проблемами, на которых в первую очередь должны концентрироваться усилия стран СНГ в области электроэнергетики, являются:

модернизация и замена оборудования, вырабатывавшего свой ресурс;

освоение перспективных технологий;

ввод новых мощностей;

координация работ в части углубления проводимых реформ в электроэнергетическом секторе экономики СНГ;

координация программ развития электроэнергетики государств Содружества;

координация процессов интеграции энергосистем государств Содружества с энергосистемами других стран.

Необходимым условием дальнейшего углубления интеграции стран СНГ в области электроэнергетики является упорядочение отношений и создание эффективных механизмов совместной работы объединенных энергосистем стран СНГ.

Вопрос о необходимости восстановления параллельной работы энергосистем государств Содружества неоднократно обсуждался на заседаниях Электроэнергетического совета СНГ. В развитие этого вопроса при активном участии органов управления энергосистем СНГ был подготовлен ряд основополагающих документов, необходимых для организации совместной работы энергосистем, в том числе:

Соглашение о параллельной работе энергосистем Содружества Независимых Государств (утверждено решением Электроэнергетического совета СНГ 26 мая 1993 г.);

Единые принципы параллельной работы энергетических систем Содружества Независимых Государств (утверждены решением Электроэнергетического совета СНГ 26 мая 1993 г.);

Соглашение об организации межгосударственного обмена информацией в области электроэнергетики Содружества Независимых Государств (утверждено решением Электроэнергетического совета СНГ 21 апреля 1994 г.);

проект Договора об обеспечении параллельной работы энергосистем Содружества Независимых Государств (одобрен на коллегии и президиуме Межгосударственного экономического комитета и

подготовлен к рассмотрению на Совете глав правительств СНГ);

проект Соглашения о поставках и транзите электрической энергии и мощности (направлен в государства Содружества).

Основные принципы параллельной работы объединенных энергосистем стран СНГ, закрепленные в названных документах, заключаются в следующем:

параллельная работа энергосистем СНГ осуществляется на основе государственного суверенитета и суверенных прав на энергетические объекты и ресурсы, равноправия, взаимного доверия, выгоды, взаимопомощи и невмешательства в вопросы внутреннего управления энергосистемами;

каждая энергосистема входит в энергообъединение стран СНГ на добровольной основе и несет полную ответственность за электроснабжение своих потребителей. Она должна покрывать нагрузку своих потребителей собственными средствами с учетом заключенных договоров на поставки электроэнергии и мощности;

ни одна энергосистема не должна своими действиями наносить ущерб энергосистемам других государств;

планирование режимов параллельной работы осуществляется на основе заключенных двусторонних и многосторонних контактов и соглашений на поставки и транзит электроэнергии и мощности;

поддержание уровня частоты в допустимом диапазоне осуществляется регулирования каждой энергосистемой своего согласованного сальдо-перетока мощности с коррекцией по частоте;

каждая энергосистема должна иметь согласованное значение резерва мощности, используемого для аварийной взаимопомощи и поддержания частоты;

энергосистемы при наличии запаса пропускной способности должны обеспечивать транзит электрической энергии через свои сети;

энергосистемы обязаны всеми имеющимися в их распоряжении средствами содействовать скорейшему выходу из аварийных ситуаций и послеаварийных режимов;

принципы организации существующих и вновь вводимых устройств АСДУ, противоаварийной автоматики, влияющих на режимы параллельной работы энергосистем стран СНГ, разрабатываются и согласовываются с органами сторон, ответственными за их техническое выполнение.

Основные положения утвержденных Электроэнергетическим советом СНГ единых принципов параллельной работы объединенных энергосистем стран СНГ соответствуют принципам совместной работы, принятым в энергообъединениях западных

стран. Однако требуется существенное углубление развития их с учетом особенностей ЭСНГ. В частности, необходима разработка законодательных актов и нормативных документов, в том числе:

законодательных актов, регламентирующих взаимоотношения энергосистем, работающих в ЭСНГ, между собой и с органами государственной власти;

механизмов оптимального использования топливных и гидравлических ресурсов, оптимального планирования развития генерирующих мощностей и электрических сетей, учитывающего интересы всех собственников, работающих в составе ЭСНГ;

механизмов оптимального распределения активных и реактивных мощностей, оптимального выбора состава работающих агрегатов ЭСНГ, оптимального планирования ремонтов в целом по ЭСНГ и распределения выгод от оптимизации между различными собственниками энергетических объектов;

требований к размеру резерва мощности для первичного регулирования частоты, времени его ввода в действие, распределению его между собственниками; требований к системам первичного регулирования частоты;

механизмов вторичного регулирования частоты и обменных потоков мощности по межсистемным линиям электропередачи; требований к времени восстановления нормальной частоты после аварии, размеру резерва мощности для вторичного регулирования частоты; требований к регулировочным характеристикам агрегатов ГЭС, ТЭС и АЭС (диапазоны регулирования мощности, время набора и сброса нагрузки); механизмов компенсации затрат собственникам, регулирующим частоту в ЭСНГ;

требований к оперативному резерву мощности и порядку его распределения по электростанциям, принадлежащим различным собственникам, работающим в составе ЭСНГ; механизмов компенсации собственниками энергетических объектов, не имеющих достаточных размеров мощности, затрат других собственников на поддержание резерва мощности;

общих требований к надежности функционирования ЭСНГ в новых условиях наличия большого числа собственников;

механизмов взаимодействия различных собственников при регулировании напряжения и реактивной мощности в сетях разного класса напряжений; механизмов компенсации затрат на регулирование напряжения и реактивной мощности;

механизмов координации систем защиты и противоаварийной автоматики, в том числе объемов АЧР и СОАН, согласования значения частоты, при которой энергосистемы могут отключаться от ЭСНГ, и значения частоты, при которой

электростанции могут отключаться от общей сети и переходить на питание собственных нужд;

условий свободного доступа в общую сеть ЭСНГ различных собственников электроэнергетических объектов;

механизмов формирования тарифов и заключения контактов;

на долгосрочную поставку электроэнергии и мощности; на краткосрочные обмены электроэнергией, осуществляемые в целях реализации оптимального режима ЭСНГ;

на передачу пиковой мощности для покрытия нагрузки;

на использование сети партнера для передачи электроэнергии;

на помощь в резерве мощности;

на помощь в аварийных ситуациях;

механизмов координации развития систем связи и обмена информацией.

В целом, основой взаимоотношений объединенных энергосистем государств Содружества в ближайшей перспективе должна стать контрактная система при жестком выполнении обязательств по совместной работе, в первую очередь по обеспечению надежности и безопасности функционирования всего энергообъединения. В будущем по мере углубления интеграционных процессов стран СНГ в электроэнергетике и экономике в целом может рассматриваться поэтапный ввод межгосударственного рынка электроэнергии и мощности подобно тому, как это осуществляется в настоящее время в Европейском Сообществе.

Планирование развития ЭСНГ должно осуществляться путем координации планов развития энергосистем стран СНГ. Каждая страна при этом может иметь свои собственные подходы к планированию развития своих энергосистем, учитывая общие согласованные критерии и требования, в первую очередь в отношении надежности и безопасности функционирования ЭСНГ в целом. Планы отдельных энергосистем затем должны рассматриваться вместе и пересматриваться на основе результатов расчетов оптимизации развития ЭСНГ в целом. Результаты этих исследований могут служить основой для проведения двух- и многосторонних переговоров с целью заключения соглашений по строительству новых электроэнергетических объектов — межсистемных линий электропередачи, электростанций совместной собственности, долгосрочным поставкам электроэнергии и др. При этом ключевой проблемой при разработке скоординированных программ развития электроэнергетики стран СНГ является выбор оптимального соотношения между объемами и видами первичных энергоресурсов и электроэнергии, импортируемыми или экспортируемыми теми или иными государствами Содружества. Актуальность этой

проблемы вызвана тем, что топливно-энергетическими ресурсами, обеспечивающими удовлетворение собственных потребителей, обладают только четыре страны: Азербайджан, Казахстан, Россия и Туркменистан. Остальные государства вынуждены их импортировать, причем в наибольшей степени это относится к Армении, Беларуси, Грузии, Молдове и Украине. В связи с этим встает проблема оптимального использования топливных ресурсов и гидроресурсов (использования запасов углей Восточной Сибири и Казахстана, газа в Западной Сибири и Туркменистане, гидроресурсов Сибири и Средней Азии) и наиболее эффективного развития систем транспорта первичных энергоресурсов и электрической энергии.

В сложившихся экономических условиях одной из важнейших задач развития электроэнергетики государств Содружества является привлечение в рациональных масштабах на взаимовыгодных условиях зарубежных инвестиций. Для достижения этой цели необходимо:

разработка и проведение эффективной ценовой политики;

совершенствование контрактно-договорной базы межгосударственных отношений, включая систему гарантий платежей, принятую в международной практике;

создание стабильной законодательно-правовой среды, привлекательной для экономических интересов зарубежных инвесторов на приемлемых для государств Содружества условиях;

урегулирование валютно-финансовых проблем в долгосрочном плане между кредитами и должниками;

обеспечение эффективной защиты внешнеэкономических интересов государств Содружества путем создания согласованного валютного и таможенного контроля, а также проведения разумной налоговой политики.

Изучение потребности в инвестициях для сооружения энергетических объектов на территории СНГ свидетельствует о том, что таких проектов, где можно реализовать взаимовыгодное сотрудничество в электроэнергетике, достаточно много. К ним относятся:

участие в разработке инвестиционного проекта ускоренного освоения добычи природного газа на полуострове Ямал с последующим использованием его для производства электроэнергии;

реализация проекта энергетического моста Россия—Беларусь—Польша—Германия с возможностью обмена значительными объемами электрической энергии и мощности;

завершение сооружения энергетических объектов (включая ГЭС), имеющих высокую степень строительной готовности;

развитие электрических сетей для повышения

надежности электроснабжения и увеличения экспортных возможностей государств Содружества; кооперация предприятий государств Содружества с западными партнерами по совместному производству энергетического оборудования.

В настоящее время в странах СНГ создается законодательная база для работы электроэнергетики в новых условиях. Подготовлены предложения по созданию новых и продолжению строительства незавершенных объектов с привлечением иностранных инвестиций.

Новая усовершенствованная тарифная политика может помочь привлечению иностранных инвестиций в электроэнергетику стран СНГ. Уже имеются примеры кооперации с западными партнерами в области совместного производства энергетического и электротехнического оборудования, в том числе с такими компаниями, как Siemens, ABB и др. Имеющиеся предложения по инвестиционным проектам в электроэнергетике государств Содружества включают в себя сооружение тепловых и гидравлических электростанций суммарной мощностью около 50 млн кВт, более 50 подстанций напряжением 220 кВ и выше с суммарной трансформаторной мощностью 100 млн кВт·А, воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ и выше общей протяженностью более 10 тыс. км.

В настоящее время готовится договор об обеспечении параллельной работы энергетических систем государств-участников СНГ, который создаст условия для усиления интеграционных процессов стран СНГ в электроэнергетике.

Расширение интеграции объединенных энергосистем стран СНГ между собой и с энергообъединениями стран дальнего зарубежья. Развитие межсистемных связей энергосистем стран СНГ. Дальнейшее развитие межсистемных связей между объединенными энергосистемами стран СНГ будет во многом зависеть от того, какие механизмы совместной работы объединенных энергосистем стран СНГ будут установлены в будущем. Ключевое значение здесь будет иметь вопрос о том, будет ли открыт свободный доступ производителей электроэнергии государств Содружества к общей электрической сети этих государств, и тем самым будут созданы условия для конкуренции производителей электроэнергии.

В существующих же условиях проведения странами СНГ политики обеспечения энергетической независимости обоснование развития межсистемных связей между объединенными энергосистемами стран СНГ в первую очередь должно предусматривать обоснование требуем (обности межсистемных связей, необходимой для реализации межсистемного эффекта оптимальным образом.

В ЭНИН были проведены комплексные исследования, имеющие целью выявление целесообразности увеличения пропускной способности межсистемных связей между ЕЭС России и энергосистемами государств Содружества и Балтии на уровне 2010 г. по условиям более полной реализации межсистемного эффекта. При исследованиях сопоставлялись затраты на усиление межсистемных связей с выгодами, которые получают от реализации межсистемного эффекта за счет сокращения затрат на требуемую генерирующую мощность и затрат на топливо. Удельные капвложения в воздушные линии электропередачи и цены на топливо для электростанций принимались на основе данных российско-американского исследования альтернатив развития электроэнергетики России и данных UNIPED [4, 5].

Проведенные исследования выявили целесообразность усиления пропускной способности связей между ОЭС Центра и Украины на 250—350 МВт, ОЭС Украины и Беларуси на 200—400 МВт в зависимости от норматива надежности и удельной стоимости резервной мощности, а также целесообразность создания межсистемных связей между ОЭС Казахстана и Средней Азии с пропускной способностью порядка 1000 МВт. При этом было получено, что требуется относительно большее усиление связей между ОЭС Центра и Поволжья, между ОЭС Урала и Поволжья, чем это было при рассмотрении отдельно ЕЭС России. Необходимо также отметить, что для случая рассмотрения энергообъединения Содружества Независимых Государств в целом потребности в усилении связей между ОЭС Северо-Запада и Центра и Северного Кавказа снижаются, что указывает на важность и необходимость полного учета межсистемных связей между объединенными энергосистемами стран СНГ при решении задачи выбора оптимальных пропускных способностей межсистемных связей на перспективу.

Развитие межсистемных связей с энергообъединениями стран дальнего зарубежья. В мире имеет место устойчивая тенденция усиления интеграционных процессов в направлении формирования крупных межгосударственных энергообъединений и создания в перспективе глобальной энергетической системы.

В Европе сложились к настоящему времени следующие межгосударственные энергообъединения:

UCPTE (Бельгия, Германия, Испания, Франция, Греция, Италия, Югославия, Люксембург, Нидерланды, Австрия, Швейцария, Португалия);

ЭСНГ (страны Содружества), работающее параллельно с объединенной энергосистемой стран Балтии;

CENTREL (Венгрия, Чехия, Словакия, Польша);

NORDEL (Норвегия, Дания, Финляндия, Швеция).

В 1995 г. к UCPTE, как указывалось выше, присоединилась энергосистема восточной части Германии (VEAG), а затем и CENTREL, после чего установленная мощность UCPTE превысила 470 млн кВт. Имеются планы воссоединения сети бывшей Югославии и Греции с сетью UCPTE, а также планы присоединения к UCPTE энергосистем Болгарии, Румынии и Албании. Проведен ряд успешных экспериментов совместной работы энергосистем Балканских стран. Следующим кандидатом на подключение к UCPTE рассматривается Турция. После ввода в эксплуатацию подводного кабеля переменного тока между Испанией и Марокко к UCPTE присоединятся энергосистемы Марокко, Алжира, Туниса. Имеющиеся проекты предусматривают до 2000 г. развитие связей между энергосистемами стран Ливии и Туниса, Египта и Ливии, Египта, Иордании и Сирии, а также создания электропередачи постоянного тока Греция—Италия. После 2000 г. предусматривается развитие связей между энергосистемами Ирана и Турции, Турции и Греции. Таким образом, имеющиеся проекты предусматривают развитие связей, которые дадут возможность создать крупное объединение энергосистем стран бассейна Средиземного моря, которое будет работать параллельно с UCPTE.

В этих условиях центральной проблемой являются вопросы использования уже существующих 11 ВЛ между странами СНГ и Восточной Европы, в строительство которых были вложены значительные средства, и разработка стратегии развития интеграции ЭСНГ с энергообъединениями стран дальнего зарубежья. Предлагаются различные варианты дальнейшего развития этих связей. Одним из вариантов предусматривается перенос вставок постоянного тока с границ между странами Западной и Восточной Европы на границы стран СНГ и стран Восточной Европы и последующая асинхронная работа расширенного энергообъединения UCPTE и ЭСНГ. Другой вариант предусматривает объединение UCPTE и ЭСНГ при синхронной работе.

Синхронное объединение UCPTE и ЭСНГ имеет ряд преимуществ по сравнению с несинхронным объединением. К основным из них относятся:

непосредственное (без сооружения вставок постоянного тока) использование уже существующих 11 ВЛ напряжением от 220 до 750 кВ между энергосистемами стран СНГ и стран Восточной Европы;

обеспечение более лучших системообразующих функций;

возможность мгновенного участия всех генераторов в первичном регулировании частоты

и повышение устойчивости поддержания частоты; упрощение реализации проекта по объединению энергосистем стран бассейна Черного моря, учитывая намеченные планы присоединения Албании, Болгарии, Греции, Румынии и Турции к УСРТЕ.

Долгий опыт работы объединенной энергосистемы стран-членов СЭВ «Мир» показал, что не принципиальных ограничений на размеры синхронно работающего энергообъединения. Однако из-за существенных различий между УСРТЕ и ЭСНГ вопрос не в расширении зоны синхронной работы ЭСНГ или УСРТЕ на принципах, используемых в одном из этих энергообъединений, а в выборе наиболее рациональных принципов совместной синхронной работы этих двух крупнейших энергообъединений.

Эти различия в основном сводятся к следующему.

Во-первых, имеются существенные различия в структуре энергообъединений и организации управления ими: УСРТЕ представляет собой централизованное энергообъединение с мощными электрическими связями внутри него, это энергообъединение развивалось как децентрализованная система, в которой нет единого центра управления. Каждая энергокомпания планирует и управляет функционированием принадлежащих ей электроэнергетических объектов при соблюдении согласованных требований к параллельной работе и выполнении заключенных двухсторонних или многосторонних соглашений.

Единая энергосистема бывшего СССР, которая трансформировалась в энергообъединение Содружества Независимых Государств, была сформирована как централизованная иерархическая структура. С помощью иерархической системы диспетчерского управления решался весь комплекс задач, связанных с ее управлением в нормальных и аварийных режимах. Энергообъединение СНГ представляет собой протяженную цепочечную структуру с относительно слабыми электрическими связями между входящими в него объединенными энергосистемами с пропускной способностью, определяемой условиями устойчивости и не превышающей в большинстве сечений 2 ГВт.

Во-вторых, к системам первичного и вторичного регулирования частоты в ЭСНГ предъявляются менее жесткие требования, чем в УСРТЕ, из-за чего частота в ЭСНГ изменяется в значительно больших пределах.

В-третьих, имеются различия в требованиях к надежности. В частности, требование выполнения критерия $(n-1)$ для электрической сети в ЭСНГ не является столь жестким, как в УСРТЕ; в регламентированных случаях при отключениях генераторов производится отключение нагрузки с помощью

специальной противоаварийной автоматики.

Синхронное объединение ЭСНГ и УСРТЕ может иметь ряд технических проблем, к основным из которых относятся:

приведение характеристик систем регулирования частоты в ЭСНГ к требованиям УСРТЕ;

проблема низкочастотных слабодемпфированных колебаний, имеющих общесистемное значение, и обеспечение устойчивости параллельной работы двух энергообъединений [6];

предотвращение распространения аварийных возмущений на большую территорию.

Что касается первой проблемы улучшения характеристик систем регулирования частоты, то в условиях избытка генерируемых мощностей в странах СНГ эта проблема может быть решена за счет более жесткого распределения обязательств по регулированию частоты между партнерами в ЭСНГ и включения большего количества генерирующих источников в процессе регулирования.

Что касается проблемы слабодемпфированных низкочастотных колебаний, имеющих общесистемный характер, и обеспечения устойчивости интегрированного энергообъединения, включающего УСРТЕ и ЭСНГ, то эта проблема может быть решена путем выбора соответствующих регулирующих устройств и мест их установки (системных стабилизаторов, компенсаторов реактивной мощности и других регулирующих устройств). Вставки постоянного тока на границах стран Восточной и Западной Европы могли бы способствовать решению этой проблемы. (Необходимо отметить, что слабодемпфированные низкочастотные колебания имели место в расширенном УСРТЕ.)

Для обеспечения устойчивости и живучести интегрированного энергообъединения и предотвращения распространения аварийных возмущений на большую территорию важную роль должны сыграть средства противоаварийного управления с целью локализации аварий и восстановления нормального режима работы интегрированного энергообъединения после аварий. В разработке средств противоаварийного управления, обеспечивающих высокую надежность и живучесть функционирования крупных энергообъединений, в странах СНГ накоплен большой положительный опыт, который может быть успешно использован при создании интегрированного энергообъединения, включающего ЭСНГ и УСРТЕ, в целом. При этом нет необходимости переходить внутри ЭСНГ полностью на правила совместной работы энергокомпаний, принятых в УСРТЕ. Представляется достаточным согласовать принципы совместной работы по границам энергообъединений.

При организации совместной синхронной работы УСРТЕ и ЭСНГ уже существующие межсистемные связи могли бы позволить получить су-

щественный экономический эффект за счет экономии топлива и уменьшения затрат на пиковую генерирующую мощность и, возможно, окупить достаточно скоро затраты, связанные с введением синхронной работы двух энергообъединений.

Что касается более отдаленной перспективы, то могут рассматриваться два основных сценария развития энергетического сотрудничества на европейском континенте. В первом сценарии кооперация может состоять в строительстве тепловых электростанций большой мощности в местах расположения дешевых углей и использования мощностей крупных ГЭС в Сибири с передачей электрической энергии по линиям электропередачи сверхвысокого напряжения в страны Восточной и Западной Европы. Согласно второму сценарию кооперация может состоять в преимущественной поставке первичных энергоресурсов из стран СНГ, и прежде всего газа, в европейские страны, а электрические связи будут использоваться для взаимовыгодных обменов электроэнергией с учетом разновременности максимумов нагрузки и большего использования тепловых электростанций с меньшей стоимостью производимой электроэнергии.

Для повышения эффективности сотрудничества необходимо, чтобы варианты развития электрических связей рассматривались совместно с вариантами развития систем транспорта первичных энергоресурсов и чтобы в целом определялись наиболее рациональные соотношения между транспортом электроэнергии и первичных энергоресурсов, а выгоды от такого решения распределялись между различными субъектами хозяйствования.

Выбор наилучших сценариев развития энергетического сотрудничества на евразийском континенте должен быть направлен на создание общего на континенте рынка электроэнергии и мощности как основы единого энергетического пространства. На решение этой задачи в настоящее время направлен ряд международных проектов.

Россией, Беларусью, Германией и Польшей рассматривается вариант строительства мощной многоподстанционной электропередачи постоянного тока, связывающей энергосистемы этих стран. Мощность передачи составляет 4000 МВт. В целом предполагается, что реализация проекта будет способствовать экономическому развитию стран, учитывающих в проекте.

Предложен проект Балтийского кольца, имеющий целью создание мощной электрической сети, связывающей энергосистемы прибрежных стран Балтийского моря — Скандинавских стран, стран Балтии, России, Беларуси, Польши и Германии. На западе Балтийское кольцо замыкается кабельными линиями электропередачи постоянного тока между Швецией и Германией, а также Данией и Германией, а в будущем — кабельными линиями между

Норвегией и Германией, Швецией и Польшей; на востоке — линиями электропередачи России, Беларуси и Балтийских государств, на севере — вставкой постоянного тока в Выборге и линиями электропередачи Скандинавских стран. При этом электропередача постоянного тока Россия — Беларусь — Польша — Германия рассматривается как часть Балтийского кольца, замыкающая его с юга. Предполагается, что Балтийское кольцо позволит улучшить эффективность работы энергосистем и будет в целом способствовать экономическому развитию стран региона Балтийского моря. К настоящему времени накоплен положительный опыт совместной работы ЕЭС России с энергообъединением NORDEL. Ведутся работы по увеличению мощности Выборгской вставки постоянного тока, а также рассматривается возможность создания новых электрических связей Карельской и Кольской энергосистем со странами, входящими в NORDEL.

Предложен проект создания объединенной энергетической системы стран бассейна Черного и Каспийского морей. Создание ОЭС Черноморско-Каспийского региона имеет целью объединение энергосистем этого региона мощными электрическими сетями, часть из которых уже существует. Такое объединение могло бы позволить более оптимальным образом развивать электроэнергетику всего региона, осуществлять рациональное использование энергоресурсов, повысить надежность электроснабжения потребителей, осуществлять взаимовыгодные обмены мощностью и электроэнергией и оказать в целом положительный эффект на экономику всех стран региона. Основу ОЭС Черноморско-Каспийского региона должны составить электрические сети высших классов напряжения, созданные странами-членами Совета Экономической Взаимопомощи на Северо-Западе региона — сети 400 и 750 кВ, связывающие Россию, Украину, Молдову, Болгарию и Румынию. На Северо-Востоке региона основу энергообъединения составят сети 330 и 500 кВ, связывающие Россию, Грузию, Армению и Азербайджан, и ВЛ 220 кВ между Турцией и Закавказскими Республиками.

К настоящему времени уже частично проведены и проводятся исследования по указанным проектам и по оценке эффективности различных вариантов усиления интеграции энергообъединений на европейском континенте.

Что касается развития межсистемных связей между расширенным энергообъединением UCPTЕ и ЭСНГ, то по данным одного из исследований рабочей группы UNIPEDE [5] уже существующие связи позволяют получить 60—80% теоретически возможного экономического эффекта за счет экономии топлива и уменьшения затрат на генерирующую мощность. При предположении, что цены на топливо одинаковы во всей Европе, допол-

нительный эффект 0,7 млрд экю в год мог бы быть получен при достижении пропускной способности между расширенным энергообъединением УСРТЕ и ЭСНГ 12 ГВт (без учета затрат на линии электропередачи). При увеличении пропускной способности более 12 ГВт дополнительные выгоды становятся незначительными.

Таким образом, объединение расширенного УСРТЕ и ЭСНГ на параллельную работу с использованием уже существующих 11 ВЛ между энергосистемами стран СНГ и стран Восточной Европы может позволить реализовать значительную часть экономического эффекта от совместной работы этих двух энергообъединений.

В настоящее время рассматривается и ряд других проектов расширения сотрудничества на всем евразийском континенте, в том числе проекты развития связей между энергообъединениями России и Китая, Японии, Кореи, энергообъединениями России и США. В качестве вариантов линий электропередачи между Россией и Китаем рассматриваются ВЛ переменного тока напряжением 500 кВ на территории ОЭС Сибири и Востока с вставками постоянного тока на границах с Китаем, а также передачи постоянного тока. Электропередачи между Россией и Японией рассматриваются через остров Сахалин, а также через территорию Китая и Кореи с пересечением морских проливов. Развитие электропередач между Россией и США рассматривается через Берингов пролив.

Важность создания и расширения электрических связей с Японией, Кореей и Китаем (его северо-восточными провинциями) обусловлена тем, что в этих регионах имеет место острый недостаток энергетических ресурсов. Важным фактором развития электрических связей является также и то, что в этих регионах имеет место существенный сдвиг годовых максимумов нагрузки, и поэтому объединение энергосистем этих стран может дать значительные экономические выгоды, в частности за счет существенного сокращения потребностей в маневренных мощностях.

Реализация рассмотренных международных проектов, а также проектов усиления межсистемных связей между ОЭС России, между ЕЭС России и ОЭС стран СНГ может позволить приступить к формированию мощной протяженной электрической цепи Япония — Китай — Сибирь — Казахстан — европейская часть России — другие страны СНГ — Восточная Европа — Западная Европа. Это явится важным этапом в создании евразийского супер-энергообъединения как одной из мощных и существенно развитых частей мировой энергосистемы. Предварительные оценки необходимой пропускной способности межсистемных связей в этом энергообъединении показывают, что необходимые пропускные способности межсистемных связей в

Евразийском энергообъединении в центральных его сечениях на территории России и Казахстана должны превышать 10 ГВт. Достижение таких пропускных способностей возможно лишь с использованием линий электропередачи сверхвысокого напряжения — 1150 кВ переменного и 1500 кВ постоянного тока. Существенное развитие электрических связей потребует также в восточном регионе России, как в пределах ОЭС Востока, так и для создания связи этой ОЭС с ЕЭС России.

Ключевое значение в формировании будущей энергосистемы евразийского континента будет принадлежать ЭСНГ, что определяется как его потенциальной ролью связующего звена со всеми остальными крупными энергообъединениями и энергосистемами, так и собственными масштабами и протяженностью ЭСНГ, составляющей около 7 тыс. км с запада на восток и 3 тыс. км с севера на юг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Электроэнергетика России. История развития и перспективы.* Под общей ред. А.Ф. Дьякова. — М.: АО Информ-энерго, 1997.
2. Джангиров В.А. *Электроэнергетика Государств Содружества: настоящее и будущее. Мировая электроэнергетика, 1997, № 4.*
3. Djakov A.F., Djanguirov V.A., Barinov V.A. Problems of coordination of planning development and operation of interconnected power systems of the Commonwealth of Independent States. — CIGRE—96, Report 37-105, Paris, 1996.
4. Совместное российско-американское исследование альтернатив развития электроэнергетики, 1995.
5. Elements for the development of a future European power system. — UNPEDE report, 1993, December.
6. Баринов В.А., Савалов С.А. *Режимы энергосистем. Методы анализа и управления.* — М.: Энергоатомиздат, 1990.

[07.07.98]

А в т о р ы : Джангиров Владимир Андреевич окончил электроэнергетический факультет Киевского политехнического института в 1957 г. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию по вопросам перспектив развития электроэнергетики в Институте экономических исследований Дальневосточного Центра АН СССР (г. Хабаровск). Председатель Исполнительного Комитета Электроэнергетического Совета СНГ.

Баринов Валентин Александрович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1965 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по вопросам математического моделирования, анализа и управления режимами сложных энергосистем в ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. Заведующий отделением перспектив развития электроэнергетики России ЭНИН им. Г.М. Кржижановского.

Маневич Александр Соломонович окончил ЭЭФ МЭИ в 1967 г. Заместитель заведующего отделением перспектив развития электроэнергетики России ЭНИН им. Г.М. Кржижановского.

Антименко Юрий Леонидович окончил факультет организации управления в энергетике Московского института управления в 1981 г. Директор департамента Исполнительного Комитета Электроэнергетического Совета СНГ.

Электрический конденсатор как элемент энергетического ядра шаровой молнии

НИКИТИН А.И.

Предложена модель шаровой молнии, энергетическим элементом которой является динамический электрический конденсатор, образованный концентрическими кольцами электронов и протонов. Протоны удерживаются на орбите благодаря кулоновскому притяжению электронного кольца, а электроны дрейфуют в скрещенных электрическом и магнитном полях, создаваемых движением протонов. Многоэлементное энергетическое ядро располагается внутри водяной оболочки, которая служит для изоляции вакуумной полости от атмосферы и для создания силы, препятствующей расширению протонных колец. Показано, что система способна накопить в виде кинетической энергии протонов энергию в несколько мегаджоулей.

Ключевые слова: шаровая молния, электрический конденсатор, движение зарядов, электрическое и магнитное поля

Шаровая молния — это автономное физическое тело приблизительно сферической формы, которое излучает свет и сложным образом движется в воздухе. Несмотря на обилие материала по наблюдению шаровых молний, собранного за 150 лет, и большое число попыток построить модель этого явления, его природа до сих пор не понята [1—8]. Результаты наблюдений указывают на то, что в составе вещества шаровой молнии присутствуют электрические заряды. Отмечено много случаев гибели шаровых молний, сопровождаемых оплавлением проводников током электрического разряда [2—5], поражением людей и животных импульсом тока [8], расщеплением диэлектрических материалов под действием заряда [9].

Самым труднообъяснимым свойством шаровой молнии является ее способность запасать в небольшом объеме (0,5—1 л) энергию, превышающую 260 МДж [8, 10, 11]. В настоящее время ни одна из предложенных теорий не может объяснить это свойство шаровой молнии. Поэтому авторы этих теорий или предлагают считать энергетические свойства шаровой молнии несущественными, или считают результаты наблюдений, где были измерены указанные экстремальные величины энергии шаровой молнии, недостоверными [3, 5, 6]. В настоящей статье мы будем считать основным свойством шаровой молнии ее высокое удельное энергосодержание и постараемся построить модель, способную объяснить энергетику шаровой молнии.

Из электрических моделей шаровой молнии

A model of a ball lightning, the energy element of which is a dynamic electric capacitor formed by concentric rings of electrons and protons, is proposed. Protons are retained on the orbit due to the Coulombs attraction of the electron ring, while electrons drift in crossed electric and magnetic fields generated by the proton motion. A multi-element nucleus is located inside a water envelope serving for isolating a vacuum cavity from the atmosphere and creating a force, which prevents the expansion of proton rings. It is shown that the system is able to accumulate the energy of several MJ in the form of kinetic energy of protons.

Key words: ball lightning, electric capacitor, charges motion, electric and magnetic fields

наиболее разработанной является модель И.П. Стаханова, согласно которой энергия молнии запасается при разделении разноименных ионов, которые окружены слоем поляризованных молекул, замедляющим рекомбинацию зарядов [3, с. 93]. Однако энергия, которая может сохраниться в 1 л воздуха при атмосферном давлении при полной ионизации молекул, не может превышать нескольких десятков килоджоулей. Действительно, пусть энергия ионизации молекулы $E_i = 10$ эВ = $1,6 \cdot 10^{-18}$ Дж. При полной ионизации в 1 л газа содержится $N_i = 3 \cdot 10^{22}$ ионов, суммарная энергия, рекомбинации которых $W_i = E_i N_i = 48$ кДж.

В упомянутой системе с накоплением энергии за счет разделения зарядов расстояние, на которое можно развести заряды, не превышает среднего расстояния λ между молекулами газа; для воздуха при атмосферном давлении $\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ см. Если каким-то способом сгруппировать одноименные заряды и развести их на макроскопическое расстояние (которое позволяют размеры сосуда объемом 1 л), то этим мы заметно увеличим работу по перемещению единичного заряда в поле остальных зарядов и за счет этого сможем накопить значительную энергию в нашей системе. Устройство, накапливающее энергию за счет разведения зарядов, известно — это электрический конденсатор. В 1859 г. Де Тесса высказал предположение, что шаровая молния — это электрический конденсатор, состоящий из двух заряженных сфер разного диаметра, между которыми находится сжатый воздух, препятствующий сближению обкладок [12]. Пусть

радиус внешней сферы $R=10$ см, а радиус внутренней сферы $r=9$ см. Электрическая емкость такого конденсатора $C=(4\pi\epsilon_0 R^2)/(R-r)=100$ пФ. (Здесь ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, равная $8,8542 \times 10^{-12}$ Ф/м.) Известно, что зазор между обкладками $d=R-r=1$ см, заполненный воздухом, способен выдержать напряжение 30 кВ, поэтому предельная энергия, которая может быть накоплена в таком конденсаторе, $W=CU^2/2=4,5 \cdot 10^{-2}$ Дж. Емкость конденсатора можно увеличить, если в пределах радиуса $R=10$ см расположить большое количество концентрических сфер, а в качестве изолятора использовать диэлектрик, пробойное напряжение для которого в 10 раз больше, чем для воздуха, но и в этом случае энергию, запасенную в конденсаторе, удастся увеличить лишь до 0,5–5 Дж [8]. Однако, несмотря на это, именно электрический конденсатор имеет резерв повышения энергозапаса, которого нет у других энергетических элементов, на основе которых строятся конкретные модели шаровой молнии. Этот резерв лежит в повышении напряжения между его обкладками. Действительно, если бы мы нашли способ увеличить напряжение, до которого заряжается конденсатор, в 1000 раз, то его энергия выросла бы в 10^6 раз.

Рассмотрим цилиндрический электрический конденсатор, внешняя обкладка которого имеет радиус R , внутренняя — r , а высота обкладок равна h . Единственный изолятор, который можно использовать в конденсаторе, заряжаемом до сверхвысокого напряжения, это глубокий вакуум. Сделав такой выбор, мы лишаем себя силы, удерживающей обкладки от сближения (типа силы давления сжатого воздуха в конденсаторе Де Тесса).

В природе известны объекты, в которых части удерживаются от сближения благодаря их движению, это, например, Солнечная система. В соответствии с этим будем считать, что наш конденсатор образован протонами, вращающимися вокруг центрального отрицательного заряда, состоящего из электронов. Для простоты изложения будем считать, что орбиты протонов и электронов лежат в одной плоскости (см. рис. 1).

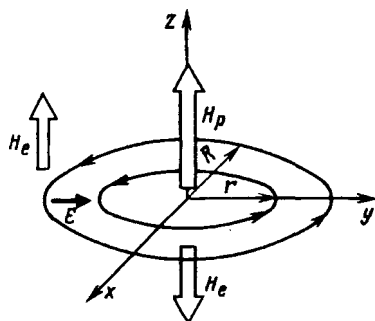


Рис. 1. Схема движения зарядов в динамическом электрическом конденсаторе. Внутреннее кольцо образовано электронами, а внешнее — протонами

Вращающиеся протоны создают внутри своей орбиты магнитное поле, вектор которого имеет составляющую \vec{H} , перпендикулярную плоскости орбиты. Будем считать, что протоны вращаются в направлении против часовой стрелки, тогда создаваемое ими магнитное поле будет направлено вверх от плоскости XY . На электроны, находящиеся внутри протонной орбиты, помимо этого магнитного поля действует ортогональное ему электрическое поле \vec{E} , что заставляет электроны совершать дрейфовое движение в направлении векторного произведения \vec{E} и \vec{H} (т.е. тоже против часовой стрелки) со скоростью [13, 14]

$$\vec{v}_d = [\vec{E} \cdot \vec{H}] / \mu_0 H^2. \quad (1)$$

(Здесь μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 1,2566 \times 10^{-6}$ В·с/(А·м).)

Для того чтобы подавить движение электронов в направлении вектора \vec{E} (т.е. вдоль радиуса), магнитное поле должно быть достаточно сильным, чтобы выполнялось условие [15, с. 75]

$$H \geq (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} E. \quad (2)$$

В магнитном поле, удовлетворяющем условию (2), электроны будут двигаться по окружности радиуса r , совершая вдоль направления поля \vec{E} колебания с амплитудой [16, с. 44]

$$a = (2mE) / (e\mu_0^2 H^2). \quad (3)$$

Амплитуда a пропорциональна массе электрона m и обратно пропорциональна величине его заряда e .

В рассмотренном цилиндрическом конденсаторе, в котором протоны движутся по орбите за счет центробежной силы, созданной зарядом электронов, а электроны тоже дрейфуют по замкнутой орбите, отпадает необходимость в физических носителях зарядов типа металлических обкладок конденсаторов. Более того, наличие таких обкладок вызвало бы автоэлектронную эмиссию зарядов из материала электродов уже при напряженности электрического поля $E=10^8$ В/м, что существенно ограничило бы энергетические возможности нашего конденсатора [17, с. 8]. Поскольку в этом конденсаторе существенную роль играет движение зарядов, назовем его динамическим электрическим конденсатором.

Рассмотренная конфигурация движущихся зарядов напоминает гидромагнитный конденсатор, в котором происходит вращение плазмы, находящейся в аксиальном магнитном поле \vec{H} [18]. Линейная скорость вращения плазмы в гидромагнитном конденсаторе $v_\theta = E / \mu_0 H$ (где E — напряженность электрического поля в пространстве между электродами). За счет вращения плазмы к энергии электрического поля, запасенной

в единице объема, $W_e = \varepsilon_0 E^2 / 2$, добавляется кинетическая энергия единицы объема $W_k = \rho v_0^2 / 2$; (ρ — плотность плазмы), в результате чего диэлектрическую проницаемость вращающейся плазмы авторы [18] представляют формулой

$$\varepsilon = 1 + (\rho v_0^2) / \varepsilon_0 E^2 = 1 + (\rho c^2) / \mu_0 H^2. \quad (4)$$

Наша система отличается от гидромагнитного конденсатора тем, что в ней магнитное поле создается не внешним магнитом, а собственным движением зарядов. Однако вывод авторов [18] о том, что значительная часть энергии конденсатора запасается в виде кинетической энергии частиц, по-видимому, должен быть справедливым и для нашего случая.

Рассмотренная система движущихся зарядов может существовать в течение длительного отрезка времени, если в ней будут присутствовать силы, обеспечивающие ее устойчивость. Проанализируем сначала, устойчиво ли движение электронного кольца в плоской системе, изображенной на рис. 1. Для определения напряженности магнитного поля $d\vec{H}$, создаваемого элементом тока протонного кольца $i d\vec{s}$ в точке, удаленной от этого элемента на расстояние l , воспользуемся формулой [19, с. 158]

$$d\vec{H} = i [d\vec{s} \cdot \vec{l}] / 4\pi l^3. \quad (5)$$

Здесь \vec{l} — радиус-вектор, проведенный от середины отрезка $d\vec{s}$ протонного кольца к точке определения напряженности поля, а i — сила тока. Проводя интегрирование, находим, что в точке с координатами $z = zR$ и $r = \eta R$ (r — расстояние от центра, определяемое в плоскости токового кольца, R — радиус кольца, z — смещение по оси Z от плоскости кольца) напряженности осевой H_z и радиальной H_r составляющих магнитного поля определяются формулами

$$H_z = i [I_1 - \eta I_2] / 2\pi R; \quad (6)$$

$$H_r = i \eta I_2 / 2\pi R, \quad (7)$$

где

$$I_1 = \int_0^\pi \frac{d\alpha}{[z^2 + (1 - \eta \cos \alpha)^2 + \eta^2 \sin^2 \alpha]^{3/2}}; \quad (8)$$

$$I_2 = \int_0^\pi \frac{\cos \alpha d\alpha}{[z^2 + (1 - \eta \cos \alpha)^2 + \eta^2 \sin^2 \alpha]^{3/2}}. \quad (9)$$

(Таблицу значений H_z можно найти в [20, с. 180].)

Согласно формуле (6) вектор \vec{H}_z направлен в сторону положительных значений z , что отвечает случаю вращения протонов по орбите в

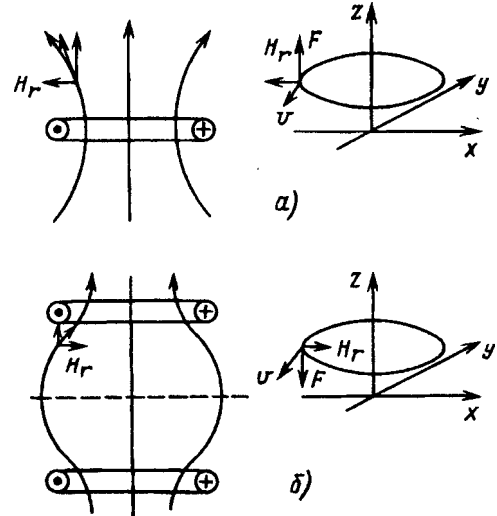


Рис. 2. Силы, действующие на электроны в магнитном поле, создаваемом движением протонов: а — магнитное поле создается одним протонным кольцом; б — магнитное поле создается двумя разнесенными протонными кольцами

направлении против часовой стрелки. Составляющая \vec{H}_r магнитного поля, создаваемого протонным кольцом, согласно формуле (7) внутри протонном орбиты положительна (т.е. составляющая \vec{H}_r направлена по радиусу наружу от центра кольца) при $z > 0$ и отрицательна при $z < 0$ (см. рис. 2,а). Если электрон, движущийся против часовой стрелки со скоростью \vec{v} по орбите, лежащей в плоскости XY , выйдет вверх из плоскости орбиты, то на него начнет действовать сила Лоренца $\vec{F} = -e\mu_0 [\vec{v} \cdot \vec{H}_z]$, направленная вдоль оси Z , которая будет уводить его еще дальше от плоскости орбиты. То же произойдет с электроном, сместившимся в противоположном направлении оси Z . Для того чтобы электроны, вышедшие из плоскости орбиты, возвращались обратно, нужно, чтобы знаки у H_r были противоположны рассмотренным.

Магнитное поле требуемой конфигурации можно получить с помощью двух соосных токовых колец одинакового радиуса, разнесенных по оси Z на расстояние $z > R$ (см. рис. 2,б). В этом случае вблизи плоскости, равноудаленной от плоскостей обоих колец, радиальная составляющая магнитного поля H_r , найденная суммированием напряженностей магнитных полей двух витков, оказывается отрицательной при выходе электрона из центральной плоскости вверх и положительной при противоположном смещении, в связи с чем сила Лоренца будет возвращать электроны в указанную плоскость.

Рассмотренный принцип осевой фокусировки орбит заряженных частиц в «бочкообразном» магнитном поле известен давно и используется в циклотронах в бетатронах [21, 22]. Из теории бетатронов также известно, что можно стабилизировать радиус электронной орбиты, если ско-

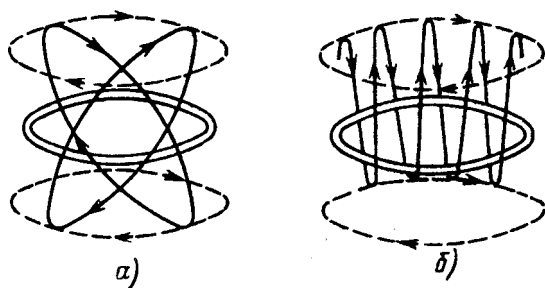


Рис. 3. Схемы орбитального (а) и полоидального (б) движения протонов в электрическом поле, создаваемом электронным кольцом. Движение протонов создает магнитное поле, эквивалентное полю двух катушек с током (пунктир)

рость уменьшения напряженности осевого магнитного поля вдоль радиуса $H_z(r) = \text{const}/r^n$ будет меньше скорости, определяемой формулой $H_z' = \text{const}/r$, т.е. при выполнении условия $n < 1$. Расчет на основе формулы (6) показывает, что в рассмотренной системе двух токовых колец, создающих «бочкообразное» поле, требуемый закон радиального спада напряженности осевого магнитного поля имеет место в области $r = (0,5 \div 0,7) R$.

Орбиты протонов, в отличие от орбиты электронов, не будут лежать в плоскости XY . Из-за кулоновского расталкивания протоны, скорее всего, выйдут из этой плоскости и будут совершать движение по многочисленным орбитам, наклоненным под разными углами к плоскости XY (см. рис. 3,а), или, вращаясь вокруг отрицательного заряда, они будут одновременно совершать колебания вдоль оси Z (см. рис. 3,б) [21, с. 109]. В обоих этих случаях магнитные поля, возникающие из-за движения протонов вдоль оси Z , будут взаимно компенсировать друг друга и останется лишь поле, вызванное азимутальным движением протонов. Нетрудно заметить, что это поле эквивалентно полю, создаваемому двумя разнесенными по оси катушками с током.

Таким образом, наша система будет представлять что-то вроде сферы со срезанными полюсами, заполненной протонными орбитами, внутри которой по кольцу будут двигаться электроны. Эта система довольно близка по конфигурации цилиндрическому конденсатору, с которого мы начали рассмотрение задачи.

Выберем для конкретности радиус внешнего электрода конденсатора R равным 0,5 см, радиус внутреннего электрода $r = 0,35$ см и высоту $h = 0,5$ см. Емкость такого конденсатора $C = (2\pi\epsilon_0 h) / \ln(R/r) = 0,78 \cdot 10^{-12}$ Ф. Если энергия электрического поля конденсатора W_e равна 100 Дж, то разность потенциалов на его обкладках $U = (2W_e/C)^{1/2} = 1,6 \cdot 10^7$ В, средняя напряженность электрического поля $E = U/(R-r) =$

$= 1,07 \cdot 10^{10}$ В/м, а заряд $Q = CU = 1,25 \cdot 10^{-5}$ Кл. На протон, движущийся со скоростью v_p по орбите радиуса R , действует сила $F_e = eE$, равная центробежной силе $F_c = (m_p v_p^2)/R$. Приравняв F_e и F_c , находим $v_p = (eER/m_p)^{1/2} = 7,15 \cdot 10^7$ м/с. (Если учесть релятивистские поправки, то получим $v_p = 7,05 \cdot 10^7$ м/с.) Частота обращения протона по орбите $\nu_p = v_p/2\pi R = 2,28 \cdot 10^9$ с⁻¹. Если суммарный заряд протонов Q_p принять равным заряду электронов Q , то сила тока, создаваемого движением протонов, $I = Q_p \nu_p = Q \nu_p = 2,85 \cdot 10^4$ А. Напряженность магнитного поля, создаваемого этим током в центре орбиты, $H = I/2R = 2,85 \cdot 10^6$ А/м.

Как уже говорилось, для подавления дрейфа электронов в направлении, противоположном вектору E , должно выполняться условие $H \geq (\epsilon_0/\mu_0)^{1/2} E = 2,654 \cdot 10^{-3} E$. При $E = 1,07 \times 10^{10}$ В/м должно быть $H \geq 2,84 \cdot 10^7$ А/м. Найденное выше значение $H = 2,85 \cdot 10^6$ А/м в 10 раз меньше этой величины, поэтому для создания магнитного поля требуемой напряженности количество протонов на орбите должно быть увеличено в 10 раз. Амплитуда радиальных колебаний электронов при $E = 1,07 \cdot 10^{10}$ В/м и $H \geq 2,84 \cdot 10^7$ А/м согласно формуле (3) составит $a \leq (2mE)/(\epsilon_0 \mu_0 H^2) = 10^{-4}$ м, что заметно меньше величины межэлектродного зазора $R-r = 1,5 \times 10^{-3}$ м.

Заметим, что если бы снаружи располагалось кольцо электронов, а внутри — кольцо протонов, то при тех же условиях амплитуда радиальных колебаний протонов a_p была бы в 1800 раз больше амплитуды колебаний электронов, $a_p = 2 \cdot 10^{-1}$ м, что превысило бы расстояние $R-r$. Поэтому выбранная нами полярность конденсатора (протоны — снаружи, а электроны — внутри) является единственно возможной.

Кинетическая энергия протонов, суммарный заряд которых $Q_p = 10 Q = 1,25 \cdot 10^{-4}$ Кл, равна $W_k = (Q_p m_p v_p^2)/2e = 3,34 \cdot 10^3$ Дж. Эта энергия в 33,4 раза превосходит электрическую энергию конденсатора $W_e = 10^2$ Дж, поэтому с достаточной степенью точности можно считать, что энергия динамического электрического конденсатора в основном запасается в виде кинетической энергии протонов. Вспомним, что похожая ситуация имеет место и для гидродинамического конденсатора [18].

Выше мы нашли, что рассматриваемая система способна удерживать внутри себя электронное кольцо (при условии, что будет стабильным в пространстве магнитное поле, создаваемое движением протонов). Теперь имеет смысл рассмотреть устойчивость движения протонов. Из-за сложного вида протонных орбит

(см. рис. 3) учет сил, действующих на заряды, провести трудно, поэтому в качестве приближения к решению задачи оценим характер и порядок сил, действующих в системе двух соосных протонных колец радиусом R , разнесенных по оси Z на расстояние $z = \alpha R$, при наличии между ними на оси Z при $z = (1/2) \alpha R$ точечного отрицательного заряда q_e . В этом случае силе кулоновского отталкивания F_i колец

$$F_i = q^2 \alpha I_1' / (2\pi R)^2 \varepsilon_0 \quad (10)$$

противостоит сила притяжения параллельных токов

$$F_m = q^2 v^2 \alpha \mu_0 I_2' / (2\pi R)^2 \quad (11)$$

и осевая составляющая силы кулоновского взаимодействия протонов с центральным отрицательным зарядом

$$F_{el} = q_e q \alpha R / 8\pi \varepsilon_0 [R^2 + 1/4 (\alpha R)^2]^{3/2}. \quad (12)$$

Здесь q — заряд протонного кольца, $q = Q_p/2$, где Q_p — полный заряд протонов, v — скорость движения протона по орбите, а I_1' и I_2' — значения интегралов I_1 и I_2 [см. формулы (8) и (9)] при $\eta = 1$ ($r = R$). Полагая $q_e = \gamma Q_p$ и решая уравнение $F_i = F_m + F_{el}$ относительно γ , находим

$$\gamma = [I_1' - \beta^2 I_2'] [1 + (\alpha/2)^2]^{3/2} / \pi. \quad (13)$$

Если расстояние между протонными кольцами $z = R$ ($\alpha = 1$), а $\beta = v/c = 0,8$, то $I_1' = 1,05347$, $I_2' = 0,5709$ и $\gamma = 0,26$. Это означает, что при размещении между протонными кольцами с суммарным положительным зарядом Q_p отрицательного заряда $q_e = 0,26 Q_p$ возможна компенсация сил, расталкивающих кольца в осевом направлении. Однако, как мы видели при оценке параметров динамического электрического конденсатора, количество электронов в системе не превышает 10% количества протонов, в связи с чем более правильным будет говорить лишь о частичной компенсации силы осевого расталкивания протонных колец.

Более серьезную проблему представляют силы, растягивающие протонные кольца в радиальном направлении. В этом случае кулоновское расталкивание одноименных зарядов, образующих кольцо, уже не компенсируется магнитным взаимодействием токов элементов кольца, поскольку равнодействующая магнитных сил тоже будет стремиться увеличить радиус кольца. Оценить порядок величины силы, растягивающей заряженное кольцо, можно из формулы [20, с. 47]

$$F_e = Q_e^2 (1 + \beta^2) L / 8\pi^2 \varepsilon_0 r_0^2. \quad (14)$$

Здесь Q_e и r_0 , соответственно, заряд и радиус

кольца, а $L \approx 6$ — множитель. Подставляя в формулу (14) $Q_e = 10^{-4}$ Кл, $\beta = 0,9$ и $r_0 = 0,1$ м, находим $F_e = 1,56 \cdot 10^4$ Н.

Протонные орбиты могли бы избежать расширения благодаря электростатическому притяжению со стороны электронов, если бы последние, в свою очередь, удерживались на орбите «жестким» внешним магнитным полем. Но, поскольку магнитное поле, в котором движутся электроны, создается протонным кольцом, способным к расширению, то «нежестким» оказывается и это поле. Поэтому для обеспечения стабильности нашей системы в ней должны присутствовать силы, препятствующие ее расширению. В качестве такой силы может, например, выступить сила атмосферного давления, действующая на оболочку, внутри которой находится система заряженных колец. Мы уже давно неявно предполагали наличие такой оболочки, отделяющей вакуумную полость, в которой происходит движение зарядов, от атмосферы. Эта оболочка, вероятнее всего, состоит из молекул воды, поляризованных в электрическом поле, создаваемом центральным положительным ядром [23]. Если эта оболочка несет положительный поверхностный заряд, то за счет взаимодействия его с центральным зарядом она будет стремиться принять сферическую форму.

Сила атмосферного давления, действующего на сферическую оболочку радиусом $R = 0,1$ м, равна $F_a = P_a \cdot 4\pi R^2 = 1,256 \cdot 10^4$ Н. (Здесь для атмосферного давления принято значение $P_a = 10^5$ Н/м².) Как видно, это сила соизмерима с полученной нами оценкой силы расталкивания заряженного кольца радиусом 0,1 м с зарядом $Q_e = 10^{-4}$ Кл. Если заряд кольца будет больше, а радиус меньше принятых значений, то силы атмосферного давления для его удержания внутри оболочки будет явно недостаточно. Поэтому следует предположить, что в нашей системе должна действовать еще одна сила, направленная к ее центру, значение которой заметно превышает силу атмосферного давления. Оценим ее порядок.

Как будет показано ниже, заряд энергетического ядра, находящийся внутри оболочки объема 1 л, может составлять $Q = 1,25 \cdot 10^{-1}$ Кл. В этом случае напряженность электрического поля в месте расположения оболочки (на расстоянии $R = 6,2$ см от центра сферы) $E = Q / 4\pi \varepsilon_0 R^2 = 2,92 \times 10^{11}$ В/м. В таком сильном поле неизбежно произойдет поляризация молекул и их выстраивание вдоль силовых линий электрического поля. Поле, создаваемое центральным зарядом Q , неоднородно. На расстоянии R от центра $\text{grad } E = -dE/dR = -Q / 2\pi \varepsilon_0 R^3 = 9,43 \cdot 10^{12}$ В/м².

В неоднородном электрическом поле на частицу, обладающую электрическим дипольным

моментом \vec{d} , действует сила $\vec{F} = \vec{d} \text{ grad } E$, направленная в сторону увеличения напряженности поля. Суммарный дипольный момент поляризованных молекул найдем, определив плотность зарядов на поверхности и умножив ее на значение толщины оболочки Δr . В кристалле льда расстояние между молекулами воды составляет $3 \cdot 10^{-10}$ м, поэтому на площади 1 м^2 может разместиться $n = 10^{19}$ молекул. В случае поляризации молекул поверхностная плотность заряда $\sigma = en = 1,6 \text{ Кл/м}^2$. На поверхности сферы радиусом $R = 6,2 \text{ см}$ может разместиться заряд $q = \sigma 4\pi R^2 = 7,725 \cdot 10^{-2} \text{ Кл}$. Примем толщину оболочки $\Delta r = 10^{-3} \text{ м}$, тогда суммарный дипольный момент оболочки $\sum d = q \Delta r = 7,725 \cdot 10^{-5} \text{ Кл} \cdot \text{м}$.

Таким образом, сила, стягивающая оболочку радиусом $R = 6,2 \text{ см}$, $F_{st} = (\sum d) \text{ grad } E = 7,29 \cdot 10^8 \text{ Н}$. Эта сила в $1,5 \cdot 10^5$ раз больше силы атмосферного давления, сжимающего сферу радиусом $6,2 \text{ см}$. Для того чтобы под действием этой силы оболочка не стянулась в точку, ей должна противодействовать сила, соизмеримая с ней по величине. Этой силой является сила, вызывающая расширение протонных колец.

Нагрузка изнутри на оболочку может быть уменьшена, если энергетическое ядро будет состоять из большого числа элементарных динамических конденсаторов, магнитные поля которых замыкаются друг на друга (см. рис. 4). В этом случае направления движения протонов в местах касания орбит соседних элементов совпадают, а элементарный конденсатор, окруженный со всех сторон другими конденсаторами, получает импульс, обеспечивающий движение протона по замкнутой орбите исключительно благодаря кулоновскому рассеянию его на протонных

орбитах соседних элементов. При равенстве радиальных составляющих импульсов соседних колец возможна ситуация, когда суммарный радиальный импульс этой системы будет равен нулю. Это означает, что внутренний элемент не будет оказывать давления, направленного наружу по радиусу макросистемы.

Проблема создания радиальной силы, направленной к центру макросистемы, возникает лишь для крайних элементов энергетического ядра. Сила, возвращающая обратно положительно заряженную частицу, летящую к оболочке, возникает из-за местной деформации оболочки, приводящей в действие силы атмосферного давления и силы поверхностного натяжения оболочки. Оболочка, обратившая движение заряда, имевшего импульс \vec{P} , приобретает импульс $2\vec{P}$ в направлении первоначального движения заряда. Встретившись с другим зарядом, движущимся в противоположном направлении с импульсом \vec{P} , оболочка может передать ему импульс $2\vec{P}$, в результате чего заряд начнет двигаться к центру, имея импульс \vec{P} , а импульс оболочки станет равным нулю.

Таким образом роль оболочки становится похожей на действие элементарных конденсаторов, со всех сторон окружающих внутренний элемент системы. Оболочка совершает что-то вроде броуновского движения, из-за ударов ядра по ней она может стать источником звука.

Энергетическое ядро, вероятнее всего, состоит из множества плоских слоев, образованных сильно связанными друг с другом динамическими конденсаторами, причем соседние слои тоже связаны друг с другом магнитными полями. Энергетически выгодно, чтобы система состояла из элементов возможно меньшего размера. Это обусловлено, во-первых, тем, что при этом увеличивается относительное число внутренних элементов по сравнению с числом периферийных (благодаря чему уменьшается давление ядра на оболочку), и, во-вторых, тем, что величина напряженности магнитного поля, связывающего элементы, растет при уменьшении радиуса R токового кольца как $1/2R$ (здесь I — ток).

Предел уменьшению радиуса протонных орбит ограничивается требованием, чтобы амплитуда радиальных колебаний электронов была меньше величины зазора между протонными и электронными орбитами, а также тем, что интенсивность синхронного излучения (основного канала потерь энергии системой) при уменьшении радиуса r электронной орбиты растет как $1/r^2$. Оценки показывают, что оптимальный размер протонных орбит находится в диапазоне от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

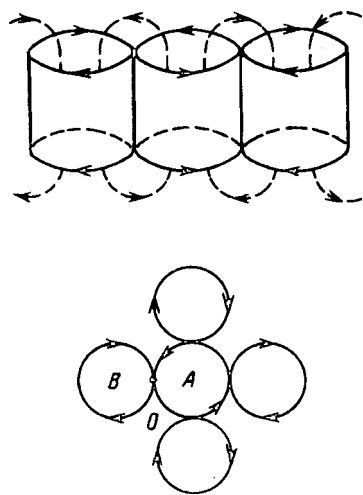


Рис. 4. Структура энергетического ядра шаровой молнии. Элементарные динамические конденсаторы попарно связаны магнитным полем. В точке касания протонных орбит происходит рассеяние протонов кольца A на протонах кольца B , при этом сумма радиальных составляющих импульсов двух протонов остается равной нулю

Система элементарных магнитов, попарно связанных друг с другом, напоминает структуру полностью размагниченного ферромагнетика и хорошо описывается схемой магнитных диполей, используемой при изложении принципов статистической термодинамики [24, с. 83]. Наша система с четным числом элементов представляет собой двухуровневую систему, характеризующуюся температурой $T = \pm \infty$ и максимальным значением энтропии. Последнее обстоятельство должно обеспечить прочность рассматриваемой «конструкции». Ее разрушение может происходить путем последовательного отщепления от нее пар элементарных магнитов, на что требуется сила, равная силе связи этой пары с остатком энергетического ядра.

Для иллюстрации энергетических возможностей обсуждаемой системы обратимся к рассмотренному выше элементарному динамическому конденсатору диаметром 1 см и высотой 0,5 см, который, как мы видели, способен запасать в виде кинетической энергии протонов 3,34 кДж. Объем этого конденсатора меньше 1 см³, поэтому внутри оболочки объемом 1 л может поместиться 1000 конденсаторов, суммарная энергия которых составит 3,34 МДж. Это сопоставимо с энергией, которая была измерена при гибели шаровой молнии в бочонке с водой. Положительный заряд элементарного конденсатора, согласно нашим оценкам, составляет $1,25 \cdot 10^{-4}$ Кл, поэтому заряд ядра из 1000 элементов должен быть равен $1,25 \times 10^{-4}$ Кл. Этот заряд создает в окружающем пространстве центрально-симметричное поле, однако стечь на внешние проводники он может только в случае пробоя вакуумного промежутка ядро—оболочка и при пробое оболочки.

Как мы уже говорили, на оболочку изнутри действуют сила электростатического отталкивания от заряженного ядра и динамическая сила, вызванная ударами ядра об оболочку. Из-за того, что силы, вызывающие радиальное расширение элементарного конденсатора, больше сил, вызывающих его осевое расширение, давление ядра на оболочку может быть анизотропным, в связи с чем ее форма может отличаться от сферической.

Оценим, с какой силой энергетическое ядро давит изнутри на оболочку радиусом $R = 6,2$ см. Площадь поверхности оболочки $S = 4\pi R^2 = 483$ см²; приняв поперечное сечение элементарного конденсатора равным 1 см², находим, что на поверхности ядра находится 483 конденсатора (из 1000). Будем считать, что каждый конденсатор, находящийся на краю энергетического ядра, окружен с трех сторон себе подобными, поэтому на оболочку падает задача обеспечения лишь четверти силы, вызывающей орбитальное движение протонов в конденсаторе. Как

мы нашли, кинетическая энергия протонов W_k^p , движущихся по орбите радиусом $R = 0,5$ см, для одного элементарного конденсатора равна $3,34 \cdot 10^3$ Дж. Центробежная сила, действующая на протоны в таком конденсаторе, $F_c = 2W_k^p/R = 1,336 \cdot 10^6$ Н.

Оболочка, как мы условились, должна обеспечивать создание 1/4 этой силы, или $3,34 \cdot 10^5$ Н. Сила, требующаяся для обеспечения орбитального движения протонов в 483 краевых динамических конденсаторах, $F_{tot} = 0,25 \cdot 483 F_c = 1,61 \cdot 10^8$ Н. Как мы нашли раньше, оболочка радиусом $R = 6,2$ см толщиной 1 мм в электрическом поле заряда $Q = 1,25 \cdot 10^{-1}$ Кл сжимается с силой $7,29 \cdot 10^8$ Н. Для создания силы $1,61 \cdot 10^8$ Н ее толщина может быть в 4,53 раза меньше и составлять 0,22 мм.

Энергетическое ядро нашей системы образовано заряженными частицами, движущимися по сильно искривленным траекториям со скоростями, близкими к скорости света. Это должно привести к появлению радиочастотного и синхронного излучений, которые являются главными каналами потерь энергии и основной причиной, ограничивающей время существования системы.

Скорость движения протонов в нашей системе, как правило, заметно меньше скорости света (в рассмотренном нами примере $v_p/c = \beta_p = 0,24$), поэтому мощность, излучаемая ими, незначительна. В противоположность этому скорость дрейфа электронов в скрещенных электрическом E и магнитном H полях при выполнении условия $H \approx (\epsilon_0/\mu_0)^{1/2} E$ может оказаться довольно близкой к скорости света, поэтому можно считать, что излучающими частицами в нашей системе являются электроны. Известно, что номер гармоники n_{max} основной частоты орбитального движения заряда, отвечающий максимуму интенсивности синхронного излучения, определяется выражением [25, с. 7]

$$n_{max} = 3/2 (W/m_0 c^2)^3, \quad (15)$$

где W — полная энергия частицы, а m_0 — ее масса покоя.

Обратимся к нашему примеру динамического конденсатора с радиусом электронной орбиты $r = 0,35$ см. Приняв скорость движения электрона равной скорости света, находим частоту обращения электрона $\nu_{rot} = c/2\pi r = 1,36 \cdot 10^{10}$ с⁻¹. Частота излучения, отвечающая красной границе видимого спектра ($\lambda_r = 700$ нм), $f_r = c/\lambda_r = 4,29 \cdot 10^{14}$ Гц, для голубой границы ($\lambda_b = 350$ нм) $f_b = c/\lambda_b = 8,57 \cdot 10^{14}$ Гц. Таким образом, для f_r находим номер гармоники $n_{max}^r = f_r/\nu_{rot} = 31544$, а для f_b $n_{max}^b = f_b/\nu_{rot} = 63015$. Для этих двух случаев из формулы (15) получаем $W_r = 14,077$ МэВ и $W_b = 17,729$ МэВ, что отвечает значениям

$v_e/c = \beta_r = 0,999343$ и $\beta_b = 0,999586$. Мощность излучения, Вт, заряда e , движущегося по орбите радиусом R , описывается формулой [25, с. 95]

$$P = 5,9917 \cdot 10^9 (ce^2 \beta^4) / [R^2 (1 - \beta^2)^2]. \quad (16)$$

Из этой формулы находим, что мощность излучения электрона при $\beta_r = 0,999343$ равна $P_r = 2,174 \cdot 10^{-9}$ Вт, а при $\beta_b = 0,999586$ $P_b = 5,477 \times 10^{-9}$ Вт. Заряд электронов Q , согласно нашим оценкам, равен $1,25 \cdot 10^{-5}$ Кл, поэтому число электронов на орбите $n_e = Q/e = 7,81 \cdot 10^{13}$, мощность их излучения $P_{\Sigma r} = 1,699 \cdot 10^5$ Вт и $P_{\Sigma b} = 4,279 \cdot 10^5$ Вт. Энергозапас в 100 Дж ансамбль электронов израсходует за время $\tau_r = 0,59 \times 10^{-3}$ с или $\tau_b = 0,23 \cdot 10^{-3}$ с.

Возможен другой механизм излучения энергии быстрым электроном — за счет ондуляторного эффекта. Мы уже говорили о том, что, двигаясь по круговой орбите, электроны совершают радиальные колебания с амплитудой $a = (2mE)/(e\mu_0^2 H^2)$ [см. форм. (3)]. Для рассматриваемого нами числового примера $a = 10^{-4}$ м. Для оценок примем, что a — это расстояние, проходя которое, электрон совершает одно радиальное колебание, тогда на длине окружности $2\pi R = 2,198$ см уложится $2\pi R/a = 220$ волн и основная частота периодического движения зарядов ν_{rot} вырастет в 220 раз: $\nu_{\text{ond}} = 220\nu_{\text{rot}} = 3 \cdot 10^{12}$ Гц. Номер гармоники ондуляторных колебаний для красного края спектра $(n_{\text{max}}^r)_{\text{ond}} = f_r/\nu_{\text{ond}} = 143$, а для синего — $(n_{\text{max}}^b)_{\text{ond}} = f_b/\nu_{\text{ond}} = 286$. Исходя из этого, находим, что энергия электрона в первом случае составляет $(W_r)_{\text{ond}} = 2,33$ МэВ, а во втором — $(W_b)_{\text{ond}} = 2,93$ МэВ. Из формулы (16) находим, что ансамбль из $7,81 \cdot 10^{13}$ электронов с указанной энергией, двигаясь по орбите радиусом $r = 0,35$ см, теряет энергию 100 Дж за время $(\tau_r)_{\text{ond}} = 0,86$ с или $(\tau_b)_{\text{ond}} = 0,33$ с. Несмотря на то, что времена «высвечивания» электронов в случае наличия ондуляторного эффекта на три порядка больше, чем для случая чисто синхронного излучения, они в сотни раз меньше, чем времена свечения наблюдавшихся шаровых молний.

Значительно уменьшить скорость потерь энергии может наличие интерференции излучения электронов, находящихся на разных участках орбиты. Действительно, если бы электроны были распределены по орбите равномерно, то их излучение было бы полностью подавлено (виток с постоянным током не излучает электромагнитной энергии) [21, с. 154]. То же справедливо и для ондуляторного излучения: для того чтобы вызвать излучение осциллирующих электронов в лазерах на свободных электронах, необходимо принимать специальные меры для группировки электронов в сгустки [26]. В нашем случае из-за

кулоновского расталкивания электроны будут стремиться равномерно распределиться по всей орбите, в результате чего их излучение будет резко ослаблено (оно будет происходить из-за флуктуаций плотности электронов).

Кроме того, в нашей системе есть другие интерференционные механизмы, ослабляющие потери энергии на излучение. Одним из них может быть интерференция излучения электронов и протонов на основной частоте их вращения. Как мы знаем (см. рис. 1), электроны и протоны движутся по орбитам в одну сторону, а это значит, что токи по орбитам текут в противоположных направлениях. Излучение, вызванное периодическим движением зарядов по орбитам, эквивалентно излучению двух диполей, в которых движение зарядов происходит в противофазе. Если эти диполи расположены на расстоянии меньше длины волны, а абсолютные величины токов, текущих в них, и частоты колебаний равны, то эта система не будет излучать энергию во внешнее пространство (энергия будет «заперта» в области между диполями).

В нашем случае полного совпадения величин частот и токов быть не может: электроны движутся по орбите малого радиуса r со скоростью v , близкой к скорости света c , а протоны — по орбите большего радиуса R со скоростью v_p , заметно меньшей c . Однако вполне возможен случай совпадения частоты второй гармоники орбитального движения протонов $2\nu_{\text{rot}}^p = v_p/\pi R$ с частотой первой гармоники движения электронов $\nu_{\text{rot}} = c/2\pi r$. Это может произойти, если скорость движения протона по орбите будет равна $v_p = cR/2r$. Для нашего случая $R = 0,5$ см и $r = 0,35$ см $v_p = 0,71$ с. Поскольку значение тока, создаваемого движением протонов, больше тока электронов (из-за преобладания в системе протонов), могут создаться условия, когда интенсивность излучения на второй гармонике движения протонов будет близка к интенсивности первой гармоники излучения электронов, что приведет к ослаблению излучения системы во внешнее пространство.

И, наконец, в энергетическом ядре, состоящем из многих однотипных элементов, возможен обмен квантами, затрудняющий выход излучения за пределы системы. Пусть $E = h\nu_{\text{rot}} = hc/2\pi r$ — энергия кванта, излученного электроном, вращающимся по орбите радиусом r (здесь h — постоянная Планка). Этот квант может поглощаться электроном, вращающимся по соседней орбите радиусом r в противоположную сторону, для этого квант должен пройти расстояние $x = 2r$, на что ему потребуется время $\Delta t = 2r/c$. Согласно принципу неопределенности квантовой механики $\Delta E \Delta t \leq h$ любая система может на вре-

мя Δt изменить свою энергию на величину $\Delta E \leq h/\Delta t$. Допустимое изменение энергии за время $\Delta t = 2r/c$ составит $hc/2r$, что в π раз больше энергии кванта $E = hc/2\pi r$. Благодаря этому в системе возможен обмен виртуальными фотонами, что должно затормозить выход излучения из внутренних частей энергетического ядра наружу. Результатом рассмотренных выше процессов может быть увеличение времени расходования энергии системы на излучение до нескольких сотен секунд.

В заключение проанализируем, какими свойствами должен обладать рассмотренный нами объект. Он представляет собой вакуумную полость, ограниченную тонкой прочной оболочкой из воды. Внутри полости находится энергетическое ядро, состоящее из тесно связанных друг с другом динамических электрических конденсаторов. Это ядро несет избыточный положительный заряд и, стремясь расшириться, давит изнутри на оболочку. Из-за анизотропии ядра сила его давления на оболочку может быть неоднородной, в связи с чем оболочка может иметь форму, отличную от сферической. Основная энергия системы запасается в виде кинетической энергии движения протонов, энергия электрического и магнитного полей элементарных динамических конденсаторов составляет от 1 до 10% энергии протонов. Система не обладает собственным магнитным полем, но способна временно намагничиваться в достаточно сильном внешнем магнитном поле.

Наличие положительного заряда определяет характер движения объекта в электрическом поле. На больших расстояниях от поверхности земли объект движется вдоль силовых линий земного электрического поля, общий характер его движения в ясную погоду сверху вниз, а в облачную — снизу вверх. Объект излучает радиоволны на частотах, близких к частотам орбитального движения электронов и протонов. В связи с этим он может наводить вихревые токи в проводниках, при очень близком контакте с человеком эти токи могут вызвать ощущение тепла. При приближении объекта к проводящей поверхности (к земле, к проводам) возможно его зависание над ней из-за равенства силы кулоновского притяжения (пропорциональной l^{-2} , где l — расстояние между объектом и проводником) и силы отталкивания индукционных токов (пропорциональной l^{-7} [27]).

Движение электронов по замкнутым орбитам является причиной того, что объект является источником синхронного (или ондуляторного) излучения. Спектр этого излучения определяется энергией электронов, при уменьшении их энергии он будет смещаться в красную сторону. При

значительном уменьшении энергии электронов максимум спектра может перейти в инфракрасную область. Излучение объекта может быть диффузным (когда подсвечивается изнутри матовая оболочка), но иногда (когда оболочка становится прозрачной) оно может принимать форму узкого луча. Угол раствора конуса, в котором сосредоточено синхротронное излучение, $d\Psi = (m_0 c^2)/W$, где W — энергия электрона [25, с. 97]. Для рассмотренных выше примеров угол конуса красного луча для синхротронного излучения $d\Psi_s = 2^\circ$, а для случая ондуляторного излучения $d\Psi_{\text{ond}} = 12,5^\circ$. Синхротронное излучение может простирается в ультрафиолетовую часть спектра. В этом случае излучение, проходя сквозь водяную оболочку, будут воздействовать на окружающий оболочку воздух, вызывая люминесценцию молекул и образование озона и окислов азота.

Наличие заряда и сложная структура энергетического ядра могут оказаться причиной того, что объект сможет изменить форму в неоднородном электрическом поле, может разделиться на части, или, наоборот, собраться из кусков.

В силу того, что основными видами энергии объекта являются энергия электрического поля и кинетическая энергия протонов, скорости выделения этих двух видов энергии при разрушении объекта будут различными: электрическая энергия будет освобождаться практически мгновенно, а процесс расходования кинетической энергии может занять довольно значительное время. Электрическая емкость сферы радиусом $r = 0,1$ м относительно земли $C = 4\pi\epsilon_0 r = 11$ пФ. При замыкании заряженной сферы на землю через сопротивление R по нему проходит импульс тока длительностью $\tau = RC$. Если разряд произойдет через человека, то при $R = 10^3 \div 10^4$ Ом $\tau = 10^{-8} \div 10^{-7}$ с. Глубина проникновения, см, тока внутрь проводника (толщина скин-слоя) $\delta = 50,33 (\rho\tau)^{1/2}$ (ρ — удельное сопротивление, Ом·мм²/м). Например, для меди $\rho = 1,75 \cdot 10^{-2}$ Ом·мм²/м и при $\tau = 10^{-8}$ с толщина скин-слоя $\delta = 0,67 \cdot 10^{-3}$ см.

Предположив, что удельное сопротивление кожи человека в 10^3 раз больше удельного сопротивления меди, находим толщину скин-слоя $\delta = 0,2$ мм (для $\tau = 10^{-8}$ с) и $\delta = 0,7$ мм (для $\tau = 10^{-7}$ с). Поэтому ток разряда проходит только по коже, не заходя в жизненно важные ткани человека, в результате чего есть большая вероятность остаться живым при ударе шаровой молнии [28]. Похожий случай разряда конденсатора малой емкости через кожу человека описан в [29, с. 76]. Для животных из-за большого удельного сопротивления шкуры встречи с шаровой молнией, напротив, кончаются трагически: большинство их гибнет [8, с. 20–22; 35].

Все перечисленные свойства рассмотренного нами энергетического объекта совпадают со свойствами наблюдавшихся шаровых молний. Однако это обстоятельство является необходимым, но пока еще недостаточным условием того, чтобы можно было наш объект полностью отождествить с реальной шаровой молнией. Для этого необходимо понять процессы, приводящие к образованию шаровой молнии в природе, и на основе этого провести опыты по ее получению в лаборатории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонов Р.А. Загадка шаровой молнии. — М.: Наука, 1965.
2. Сингер С. Природа шаровой молнии. — М.: Мир, 1973.
3. Стаханов И.П. Физическая природа шаровой молнии. — М.: Атомиздат, 1979.
4. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. — М.: Мир, 1983.
5. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Смирнов Б.М. Проблема шаровой молнии. — М.: Наука, 1988.
7. Григорьев А.И., Григорьев И.Д., Ширяева С.О. Наблюдения шаровых молний и их анализ. — В сб. «Химия плазмы» / Под ред. Б.М. Смирнова. — М.: Энергоатомиздат, 1993.
8. Имянитов И., Тихий Д. За гранью законов науки. — М.: Атомиздат, 1980.
9. Лихошерстных Г.У. Аномальные случаи встреч с шаровой молнией. — В сб. «Шаровая молния в лаборатории» / Под ред. Р.Ф. Авраменко, В.Л. Бычкова, А.И. Климова, О.А. Синкевича. — М.: Химия, 1994.
10. Morris W. A thunderstorm mystery. — Daily Mail (London), 5 July 1936.
11. Goodlet B.L. Lightning. — J. Inst. Elect. Eng., 1937, vol. 81.
12. De Tesson. Sur la foudre en boule. — Compte Rendu, 1859, т. 49.
13. Арцимович Л.А. Элементарная физика плазмы. — М.: Атомиздат, 1969.
14. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. — М.: Атомиздат, 1968.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. — М.: ГИФМЛ, 1960.
16. Арцимович Л.А. Управляемые термоядерные ре-

акции. — М.: ГИФМЛ, 1961.

17. Латам Р. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. — М.: Атомиздат, 1985.
18. Anderson O., Baker W.R., Bratenahl A. et al. Hydromagnetic capacitor. — J. Appl. Phys., 1959, vol. 30, No 2.
19. Калашников С.Г. Электричество. — М.: Наука, 1985.
20. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. — М.: Атомиздат, 1979.
21. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. — М.: Наука, 1978.
22. Москалев В.А. Бетатроны. — М.: Энергоиздат, 1981.
23. Месеняшин А.И. НЛО — это пузыри? — Химия и жизнь, 1990, No 10.
24. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. — М.: Наука, 1977.
25. Тернов И.М., Михайлин В.В., Халилов В.Р. Синхротронное излучение и его применения. — М.: Изд-во МГУ, 1980.
26. Девятков Н.Д., Наumenko Е.Д., Рухадзе А.А. и др. Особенности механизма когерентного оптического излучения в релятивистских ондуляторных приборах. — ЖТФ, 1997, т. 67, No 11.
27. Okkress E.C., Wroughton D.M., Comenetz G. et al. Electromagnetic levitation of solid and molten metals. — J. Appl. Phys., 1952, vol. 23, No 5.
28. Бочаров Г. Драма в долине. — Литературная газета (Москва), 21 декабря 1983 г.
29. Сенченков А.П. Техника физического эксперимента. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

[26.03.98]

Автор: Никитин Анатолий Ильич окончил физический факультет Московского государственного университета в 1961 г. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Индукцированное излучение и химические реакции при неравновесном колебательном возбуждении молекул» в Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова. Ведущий научный сотрудник Института энергетических проблем химической физики Российской Академии наук.

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие биографические сведения об авторах. В связи с этим просим всех авторов при направлении статьи в редакцию сообщить следующие сведения:

1. Полные имена и отчества всех авторов
2. Какой факультет, какого вуза и когда закончил
3. Когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита
4. Место настоящей работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4—5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

Потенциальная помехоустойчивость устройств защитного отключения, реагирующих на гармонический сигнал

ПОПОВ В.М.

Представлен анализ помехоустойчивости устройств защитного отключения, использующих для обнаружения опасности поражения электрическим током гармонический сигнал. Приведены характеристики обнаружения этих устройств на амплитуду, приращение тока нулевой последовательности и на сигнал не промышленной частоты.

Ключевые слова: устройство защитного отключения, помехоустойчивость, обнаружение утечки, электробезопасность

При случайном прикосновении человека к токоведущим частям исправной электрической цепи традиционные меры защиты, такие как зануление и защитное заземление, его не спасут. В подобных ситуациях уменьшить опасность электропоражения способны лишь устройства защитного отключения (УЗО), которые реагируют на возникновение опасного тока через тело человека. Опасными для человека считаются значения токов всего в несколько миллиампер. Так, для промышленных сетей переменного тока частотой 50 Гц с напряжением до 1000 В предельное значение длительно допустимого тока через тело человека согласно ГОСТ 12.1.038-82 составляет 6 мА. Обнаружить такой слабый сигнал в реальной сети, где рабочие токи достигают сотен и тысяч ампер, а коммутации производятся случайным образом, где имеются высшие гармоники напряжения и т.п., — задача непростая. Приступая к созданию устройства для работы в сложной электромагнитной обстановке, необходимо иметь представление о том, какой помехоустойчивости можно достичь при идеальной реализации того или иного способа защитного отключения. Предельно достижимую помехоустойчивость принято называть потенциальной.

Помехоустойчивость УЗО определяется, с одной стороны, способностью обнаружить возникновение опасного тока в теле человека, с другой стороны, невосприимчивостью ко всем остальным сигналам. Возможные ошибки характеризуются соответственно вероятностью пропуска сигнала опасности β и вероятностью ложного срабатывания α [1].

Очевидно, что добиться снижения одной из этих ошибок в рамках определенного способа можно только за счет увеличения другой. Следовательно, для оценки помехоустойчивости необходимо выяснить характер взаимосвязи α и

An analysis of noise immunity protection cut-off devices, which use a harmonic signal for detecting the danger of electric shock is given. Characteristics of the devices considered, responding to the increase of a zero sequence current, its amplitude and the unindustrial signal are given.

Key words: protection cut-off devices, noise immunity, leakage detection, electrical safety

β при различных соотношениях сигнала и помехи. Удобнее всего выразить эту взаимосвязь с помощью характеристик обнаружения, представляющих собой зависимость вероятности обнаружения сигнала опасности $1-\beta$ от отношения сигнал—помеха при фиксированной вероятности α . Целью настоящей статьи является определение характеристик обнаружения УЗО, реализующих наиболее распространенные принципы защитного отключения, основанные на измерении суммы мгновенных токов утечки через проводимости изоляции фаз сети.

При анализе будут учитываться только те помехи, частота которых совпадает с частотой напряжения сети. Рассмотрение только одного вида помех означает, что речь идет о потенциальной помехоустойчивости, соответствующей идеальной фильтрации.

Проблемы обеспечения помехоустойчивости УЗО наиболее остро стоят при наличии в сети мощных электроприемников с изменяющимся во времени электропотреблением. Исследования таких сетей показывают, что распределение амплитуд суммы мгновенных токов помех (помех на выходе датчика тока нулевой последовательности) является релеевским. Обозначив символом V_0 отсутствие опасности электропоражения, символом x амплитуду сигнала, пересчитанную к первичной обмотке датчика тока нулевой последовательности, можно записать амплитудное распределение помехи I_n следующим образом:

$$W(x/V_0) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где σ — параметр закона распределения, характеризующий среднеквадратичное отклонение амплитуды помехи. Распределение фазы таких помех можно считать равномерным.

Что касается распределения сигнала, то оно зависит от множества случайных факторов: характера выполняемой работы, сопротивлений электрических связей человека с элементами сети и электроустановок, значения опасного напряжения, сопротивления человека и т.д. Более или менее исследованным является лишь распределение сопротивления тела человека, поэтому о виде распределения тока через человека нельзя сказать ничего определенного. В подобных случаях обычно используют наименее предпочтительное распределение, которое минимизирует вероятность правильного обнаружения для заданной вероятности ложных срабатываний. При таком подходе можно быть уверенным, что вероятность правильного обнаружения, соответствующая истинному распределению сигнала, больше или равна значению, полученному с помощью наименее предпочтительного распределения. Очевидно, что наименее предпочтительное распределение амплитуды тока через человека I_{hm} имеет вид дельта-функции:

$$W_{\text{нп}}(I_{hm}) = \delta(I_{hm} - I_{hmd}), \quad (2)$$

где I_{hmd} — амплитуда предельно допустимого тока через человека.

Это означает, что сигнал опасности можно считать детерминированным и $I_{hm} = I_{hmd}$.

Из принципов защитного отключения, основанных на измерении суммы мгновенных токов утечки, наиболее простым и распространенным является принцип, согласно которому отключение электроприемников в зоне защиты происходит при превышении амплитуды тока нулевой последовательности некоторого уровня, соответствующего уставке УЗО. Поскольку фаза вектора помехи распределена равномерно, а амплитуда распределена по закону Релея, он имеет в декартовой системе координат гауссовские проекции с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $D = \sigma^2$ [2]. Считая, что одна из координатных осей совмещена с вектором сигнала I_h , для амплитуды смеси сигнала с помехой можно записать

$$x = \sqrt{(I'_{hm} + I'_{\text{пм}})^2 + I''_{\text{пм}}{}^2}. \quad (3)$$

Здесь $I'_{\text{пм}}$ и $I''_{\text{пм}}$ — декартовы координаты вектора $I_{\text{п}}$, распределенные по нормальному закону:

$$W(I'_{\text{пм}}) = W(I''_{\text{пм}}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{I'^2_{\text{пм}}}{2\sigma^2}}. \quad (4)$$

Плотность распределения суммы $I_{hm} + I'_{\text{пм}}$ также является нормальной с дисперсией $D = \sigma^2$, но с математическим ожиданием, равным I_{hmd} , что вытекает из условия (2). Функция (3) от гауссовских случайных величин имеет рас-

пределение Релея—Райса [3]:

$$W(x/V_1) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + I_{hmd}^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{I_{hmd}x}{\sigma^2}\right), \quad (5)$$

где V_1 — символ, обозначающий наличие опасности электропоражения; I_0 — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Выражения (4) и (5) позволяют рассчитать характеристики обнаружения УЗО, реагирующих на амплитуду тока нулевой последовательности. В соответствии с критерием Неймана—Пирсона [1] по заданной вероятности ложного срабатывания определяется пороговый уровень C_m , а затем вычисляется вероятность обнаружения сигнала опасности. Выражение для вероятности ложного срабатывания имеет следующий вид:

$$\alpha = \int_{C_m}^{\infty} W(x/V_1) dx = \int_{C_m}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = e^{-\frac{C_m^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

отсюда

$$C_m = \sigma\sqrt{-2\ln\alpha} \quad (7)$$

и

$$1 - \beta = \int_{C_m}^{\infty} W(x/V_1) dx = \int_{C_m}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + I_{hmd}^2}{2\sigma^2}} \times I_0\left(\frac{I_{hmd}x}{\sigma^2}\right) dx. \quad (8)$$

Принимая $x/\sigma = \rho$; $I_{hmd}/\sigma = v$ и $C_m/\sigma = u$, получаем интеграл, для вычисления которого существуют стандартные программы:

$$Q(u, v) = \int_u^{\infty} \rho e^{-\frac{1}{2}(v^2 + \rho^2)} I_0(v\rho) d\rho.$$

По выражениям (6)–(8) построена поверхность, отображающая характеристики обнаружения (рис. 1). Эта поверхность характеризует иде-

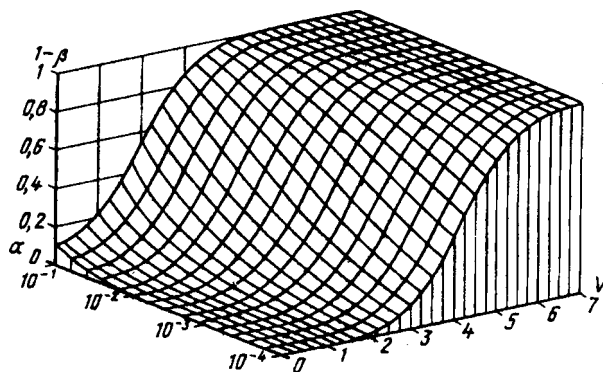


Рис. 1. Потенциальная поверхность обнаружения УЗО, реагирующих на амплитуду тока нулевой последовательности

альное в отношении подавления частот, отличных от частоты сети, УЗО, поэтому ее можно назвать потенциальной.

Графически поверхность представлена сеткой изолиний одинаковых отношений сигнал—помеха и вероятностей пропуска сигнала опасности. Видно, что устройства, реализующие рассматриваемый принцип защитного отключения, обеспечивают близкую к единице вероятность обнаружения сигнала опасности лишь при большом отношении сигнал—помеха ($I_{\text{нмд}}/\sigma$). Очевидно, что при $I_{\text{нмд}} = 6\sqrt{2} \approx 8,5$ мА это отношение в сетях с мощными электроприемниками слишком мало, чтобы здесь можно было использовать УЗО, реагирующие на амплитуду тока нулевой последовательности. Например, в сети с козловым краном КС 50-42Б ($\sigma = 0,226$ А) отношение сигнал—помеха равно 0,0376. Даже при $\alpha_A = 0,1$, что совершенно не достаточно для устойчивой работы электрооборудования, вероятность обнаружения опасности составит лишь 0,101.

Следующий принцип, который предлагается рассмотреть, основан на использовании в качестве измерительного сигнала приращения амплитуды тока нулевой последовательности. Реализуется такой принцип с помощью автоматической компенсации тока помехи. Ввиду несовершенства элементной базы идеальную компенсацию обеспечить невозможно, поэтому сравнение сигнала опасности с установленным пороговым уровнем происходит в условиях действия помех, правда, в значительной степени ослабленных. Практически это означает, что среднеквадратичное отклонение амплитуды помехи соответствующим образом уменьшается. Недостатком данного принципа является невозможность компенсации помех, возникающих при коммутациях электроприемников в зоне защиты. Поэтому его применение сочетается с блокировкой УЗО в моменты коммутаций электроприемников на время τ_6 , за которое формируется новый компенсирующий сигнал. Можно считать, что в интервалах блокировки вероятность ложных срабатываний равна нулю, а вероятность пропуска сигнала опасности равна единице. Если в интервалах функционирования УЗО вероятность ложных срабатываний равна α_ϕ , а вероятность пропуска сигнала опасности равна β_ϕ , то среднее значение вероятности ложных срабатываний α_k и среднее значение вероятности обнаружения сигнала опасности $1-\beta_k$ определяются по формулам:

$$\alpha_k = q_6 \alpha_\phi; \quad (9)$$

$$1 - \beta_k = q_6 (1 - \beta_\phi), \quad (10)$$

где q_6 — вероятность того, что в момент сравнения сигнала с пороговым уровнем УЗО не

заблокировано.

Вероятность q_6 зависит от среднего числа коммутаций N_k за некоторое время T_n :

$$q_6 = \frac{T_n - N_k \tau_6}{T_n}. \quad (11)$$

Для нахождения вероятности α_ϕ и $1-\beta_\phi$ необходимо найти условные плотности распределения $W_\phi(x/V_0)$ и $W_\phi(x/V_1)$. Поскольку отличие данного случая от предыдущего состоит только в уменьшении значения параметра распределения помехи, для определения условных плотностей распределения можно воспользоваться формулами (1) и (5), заменив в них параметр σ на $\sigma_k = \eta\sigma$. Здесь η — коэффициент ослабления помех. Точно также для нахождения α_ϕ и $1-\beta_\phi$ можно использовать формулы (6)–(8).

Таким образом, для построения характеристик обнаружения УЗО, осуществляющих компенсацию помех, необходимо задаться α_k и, вычислив из (9) α_ϕ , определить с помощью выражений (6)–(8) зависимость $1-\beta_\phi$ от отношения сигнал—помеха, а затем пересчитать ее по формуле (10) к значениям $1-\beta_k$.

На рис. 2 показаны характеристики обнаружения, построенные для минимально возможного при частоте 50 Гц $\tau_6 = 20$ мс и наилучшего при существующей элементной базе $\eta = 0,02$. Характеристики рассчитаны для значений $N_k = 120$ и $T_n = 10$ с, определенных экспериментально при исследованиях сети с козловым краном. Из рис. 2 видно, что, хотя поверхность обнаружения по сравнению с рис. 1 переместилась в область малых отношений сигнал—помеха, вероятность обнаружения сигнала опасности в силу (10) не может превысить значения q_6 (в данном случае равного 0,76) ни при каких условиях.

Как показал анализ, использование напряжений сети для обнаружения опасности сопряжено с необходимостью устранять влияние помех с частотой сети, которые могут существенно превосходить измеряемый сигнал по уровню. При

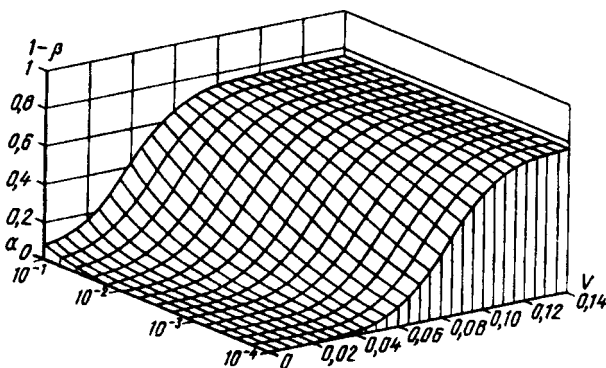


Рис. 2. Потенциальная поверхность обнаружения УЗО, реагирующих на приращения амплитуды тока нулевой последовательности

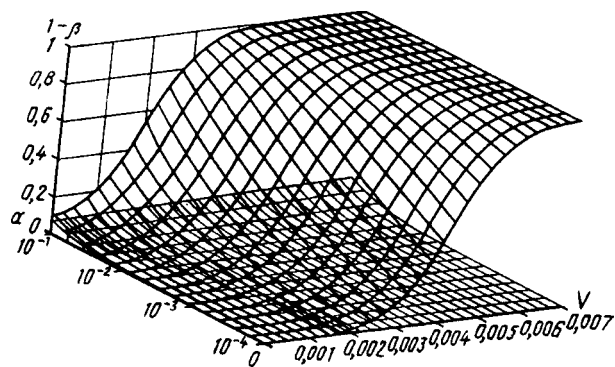


Рис. 3. Потенциальная поверхность обнаружения УЗО с источником оперативного напряжения непрямоугольной частоты

значительных изменениях этого уровня во времени добиться приемлемой надежности электроснабжения удастся лишь ценой заведомого ограничения эффективности защиты. Существенно снизить влияние помех с частотой сети и ее гармоник позволяет использование оперативного напряжения непрямоугольной частоты [4]. При этом с помощью полосового частотного фильтра можно практически полностью подавить дискретные составляющие спектра сетевых помех. Что касается непрерывной составляющей спектра, то уже на частоте 70 Гц ее уровень на 60 дБ меньше, чем при 50 Гц [5]. Таким образом, выбрав частоту оперативного напряжения равной среднегеометрическому между частотами первой и второй гармоник частоты сети — 70 Гц, параметр распределения помех, благодаря фильтрации, можно снизить в 1000 раз.

Характеристики обнаружения УЗО, формирующих оперативное напряжение непрямоугольной частоты, легко получить из характеристик, изображенных на рис. 1, уменьшив соответственно

их масштаб по оси абсцисс. На рис. 3 показана потенциальная поверхность обнаружения, построенная для коэффициента ослабления сетевых помех на частоте оперативного напряжения, равного 0,001. Для сравнения здесь же приведена поверхность обнаружения рис. 2.

Сопоставление характеристик обнаружения УЗО, реализующих три рассмотренных принципа, показывает, что последний обладает значительными преимуществами. Его можно применять в сетях не только с изолированной, но и с заземленной нейтралью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревякин А.И., Попов В.М. О критерии качества автоматических средств защиты в электроустановках. Пути повышения надежности и ресурса электрических аппаратов: Сб. научн. трудов. — М.: Изд-во МЭИ, вып. 167.
2. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. — М.: Радио и связь, 1982.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. — М.: Советское радио, 1974.
4. А.с. 1432422 (СССР). Устройство для измерения активного сопротивления изоляции в сетях с заземленной нейтралью / В.М. Попов, А.И. Ревякин. — Оpubл. в БИ, 1988, № 39.
5. Осипов О.И., Усынин Ю.С. Промышленные помехи и способы их подавления в вентильных электроприводах постоянного тока. — М.: Энергия, 1979.

[16.12.97]

Автор: Попов Виктор Михайлович окончил радиотехнический факультет Новосибирского электротехнического института в 1975 г. Защитил кандидатскую диссертацию в Московском энергетическом институте в 1988 г. по теме «Помехоустойчивость автоматических средств защиты в электроустановках». Доцент кафедры охраны труда Новосибирского государственного технического университета.

К сведению авторов и читателей!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала (Б. Черкасский пер., 2/10, тел. 924-24-80).

Исследование установившихся режимов работы синхронного двигателя с совмещенным индукторным возбудителем методом проводимостей зубцовых контуров

ПУЛЬНИКОВ А.А., ПЛАСТУН А.Т., ДЕНИСЕНКО В.И.

На основе метода проводимостей зубцовых контуров разработана математическая модель для расчета установившихся режимов синхронных двигателей с совмещенным индукторным возбудителем. Приведены алгоритмы и примеры расчета режимов холостого хода, номинальной нагрузки, регулирования активной и реактивной мощности. Определен запас возбудителя по мощности в различных установившихся режимах.

Ключевые слова: синхронные двигатели, установившиеся режимы, совмещенный индукторный возбудитель, метод проводимостей зубцовых контуров

Совместить в одной магнитной системе возбуждаемую синхронную машину и возбудитель является весьма заманчивой идеей. Исследования [1—3] показывают возможность использования совмещенного индукторного возбудителя для синхронных двигателей общепромышленного исполнения. Эта идея успешно реализуется в совмещенном многофункциональном бесщеточном возбудителе (СМБВ), где одним из подвозбудителей является совмещенный индукторный возбудитель [5, 6].

Совмещенный индукторный возбудитель — нетрадиционно совмещенная электрическая машина [4]. В нем допускаются взаимоиндуктивные связи между совмещаемыми электрическими машинами. Полем возбуждения совмещенного индукторного возбудителя является результирующее поле в воздушном зазоре возбуждаемой синхронной машины. Как известно, на результирующее поле в воздушном зазоре существенное влияние оказывает режим работы машины. Совмещенный индукторный возбудитель должен обеспечить требуемый запас по мощности во всех режимах работы возбуждаемой машины. Для определения этого запаса необходимо рассчитать результирующее магнитное поле в воздушном зазоре во всех режимах работы с учетом разматывающего действия поля реакции якоря и насыщения всех участков магнитной цепи. Исследования [7—10] показывают, что если возбудитель обеспечивает заданную кратность форсировки в установившихся режимах работы синхронной машины, то обычно он обеспечивает требуемые динамические показатели. Поэтому определение запаса совмещенного индукторного возбудителя по мощности в установившихся ре-

A mathematical model for calculating steady-state operating conditions of synchronous motors with combined inductor exciter has been developed on the basis of a tooth conductivity method. Algorithms and examples of calculating no-load, nominal load and active and reactive power control regimes are given. The exciter power reserve under various steady-state operating conditions is determined.

Key words: synchronous motors, steady-state operating conditions, combined inductor excitor, tooth conductivity method

жимах работы является одним из основных при проектировании синхронных двигателей с совмещенным индукторным возбудителем.

В [11] показано, что наиболее подходящим методом для расчета установившихся режимов сложного технического комплекса «синхронный двигатель — совмещенный индукторный возбудитель» является метод проводимостей зубцовых контуров (МПЗК) [12].

Особенности применения МПЗК. Шаг якорной обмотки совмещенного индукторного возбудителя без укорочения равен половине зубцового деления статора. Как показано в [11, 13], при геометрических размерах зубцовой зоны, характерных для обычных синхронных машин средней и большой мощности, ЭДС практически синусоидальна. ЭДС катушек якорной обмотки может быть найдена по разности сцепленных с витками катушки потоков в зубце индуктора в случае нахождения индуктора под зубцом (Φ_z) и под пазом статора (Φ_n):

$$E_K = \pi \sqrt{2} f \omega ((\Phi_z - \Phi_n)/2) k_0.$$

Для определения ЭДС катушек и всей якорной обмотки достаточно рассчитать поле в воздушном зазоре и магнитную цепь машины для двух положений ротора относительно статора: зубец индуктора находится под зубцом статора; зубец индуктора находится под пазом статора.

Магнитная цепь машины в воздушном зазоре представляет собой схему, приведенную на рис. 1. После преобразования треугольников в звезду получим схему магнитной цепи для числа пазов на полюс и фазу $q=2$ (рис. 2).

Применив метод узловых потенциалов для решения магнитной цепи с регулярной сеткой,

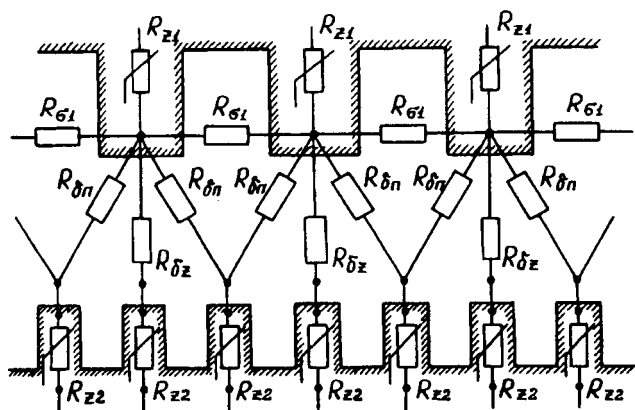


Рис. 1. Схема магнитной цепи машины в воздушном зазоре

получим диагональную матрицу коэффициентов с минимальным числом диагоналей. Регулярная сетка позволяет легко формализовать алгоритмы расчета магнитных проводимостей, формирования системы нелинейных алгебраических уравнений, расчета индукции магнитного поля на участках магнитной цепи, решения нелинейной задачи и постпроцессорной обработки данных. Как показывает практика программирования и решения систем линейных алгебраических уравнений с диагональными симметричными разреженными матрицами коэффициентов при неизвестных, ненулевые элементы матрицы можно компактно хранить в одномерных массивах. Это дает значительную экономию памяти, что немаловажно при решении такой задачи, как расчет

магнитной цепи синхронной машины с помощью метода проводимостей зубцовых контуров. Кроме того, в алгоритме решения системы линейных алгебраических уравнений отсутствуют операции с нулевыми элементами матрицы, что значительно ускоряет решение.

Проводимости зубцовых контуров статора рассчитывались с помощью метода конечных элементов для скалярного потенциала магнитного поля.

Сетка треугольных элементов для расчетной области, представляющей собой половину зубцового деления статора, изображена на рис. 3. Функционал, для которого уравнение Лапласа для скалярного потенциала магнитного поля

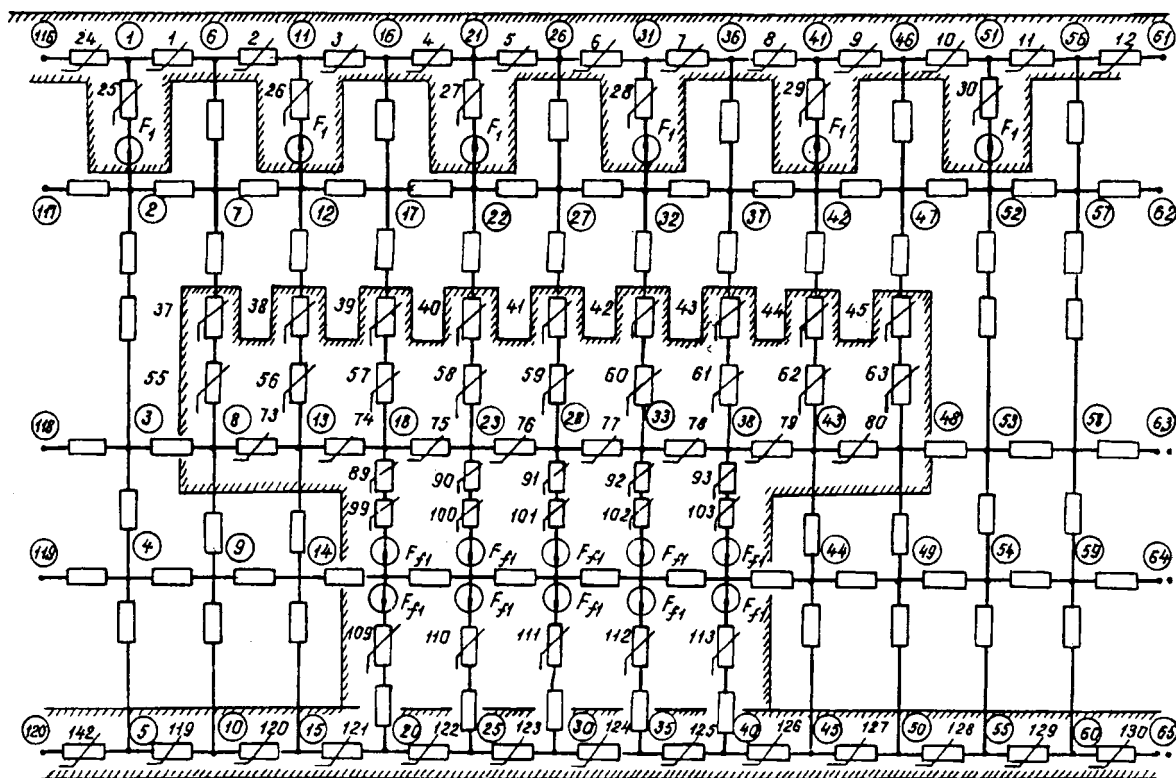
$$\partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2 = 0$$

является уравнением Эйлера—Лагранжа, имеет вид:

$$F = (1/2) \int \int_D [(\partial U / \partial x)^2 + (\partial U / \partial y)^2] dx dy.$$

Решением уравнения Лапласа будет такая функция $U(x, y)$, которая дает минимум указанного функционала. Способы минимизации функционалов в методе конечных элементов можно найти в достаточно обширном числе публикаций, например в [14, 15].

В случае неравномерного воздушного зазора удельные магнитные проводимости зубцовых контуров находились для размеров зазора по



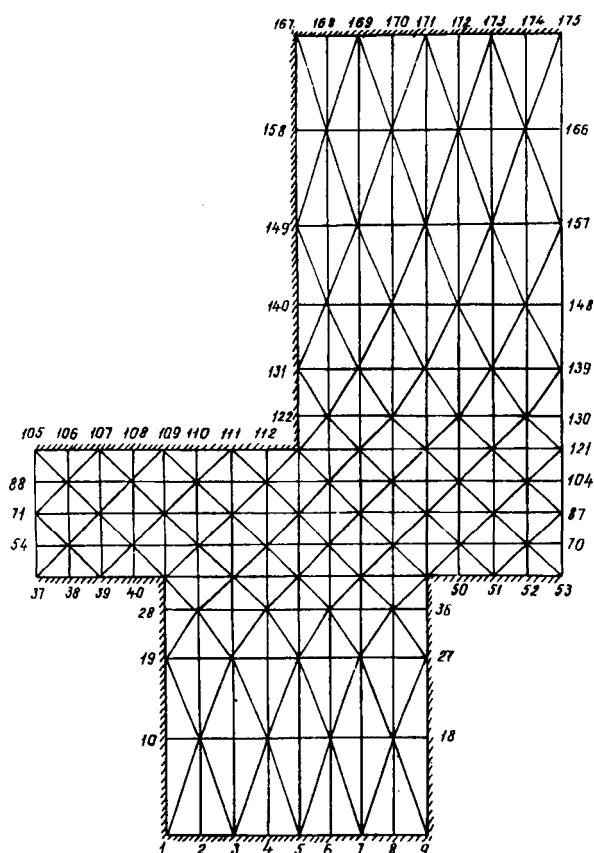


Рис. 3. Сетка треугольных элементов

осям зубцов индуктора.

Способы решения магнитной цепи и алгоритм формирования системы нелинейных алгебраических уравнений. Существуют два пути, по которым можно пойти в процессе решения магнитной цепи. Они определяются способом решения системы нелинейных алгебраических уравнений. Первый путь — составление системы нелинейных уравнений таким образом, чтобы для ее решения можно было применить метод Ньютона [12]. Матрица Якоби в этом способе может быть выражена в явном виде. Нелинейные коэффициенты явно выражаются через нелинейную интерполяцию, например, с помощью кубического сплайна, производной магнитных напряжений ветвей магнитной схемы по потокам ветвей $\partial U_M / \partial \Phi_z$. Указанный способ решения магнитной цепи достаточно эффективен, но трудоемок. В [12] также показано, что для синхронной явнополусной машины выражение для матрицы Якоби становится слишком громоздким. В этом случае можно пойти по пути решения системы нелинейных алгебраических уравнений, представленной в неявном виде, например, воспользоваться методом контурных токов или методом узловых потенциалов. Более удачно формализуется метод узловых потенциалов, следовательно, он более удобен для про-

граммирования.

Исследования, проводимые в проблемной лаборатории электрических машин Уральского государственного технического университета, показывают, что системы нелинейных алгебраических уравнений, записанные в неявном виде, можно эффективно решать с помощью метода, предложенного в [11].

Нумерацию узлов магнитной цепи наиболее удобно делать по столбцам, поскольку это дает более узкую диагональную матрицу коэффициентов при неизвестных. Регулярная сетка магнитных проводимостей удобно формализуется в зависимости от числа пазов на полюс и фазу q .

Для экономии памяти задача решалась только на пару полюсов. В случае расчета поля в машине только на пару полюсов для правильного учета влияния поля реакции якоря при нагрузке на суммарное поле в машине необходимо приравнять потенциалы узлов в слое в начале и в конце схемы, как бы замкнув при этом схему саму на себя.

Значения масштабных коэффициентов токов зубцовых контуров были рассчитаны для различных схем обмоток в зависимости от числа пазов на полюс и фазу (для целых q) и различных коэффициентов укорочения обмотки. Эти данные помещены в файл данных; в зависимости от q и коэффициента укорочения делается нужная выборка масштабных коэффициентов токов зубцовых контуров. Значения МДС зубцовых контуров для заданного режима рассчитывались с учетом угла нагрузки.

Режим холостого хода. Значение тока возбуждения холостого хода i_0 предварительно определяется по обычной методике расчета синхронных машин, например [16, 17]. Затем с помощью метода проводимостей зубцовых контуров рассчитывается ЭДС холостого хода синхронной машины дифференцированием кривой потока $\Phi(x)$. Зависимость $\Phi(x)$ определяется для положений: зубец против зубца и зубец против паза. Значения потока $\Phi(x)$, сцепленного с катушкой якорной обмотки с диаметральной шагом, определяются суммированием потоков в ветвях схемы магнитной цепи (рис. 2) при движении катушки вдоль расточки статора. Графики зависимости $\Phi(x)$ для различных значений тока возбуждения представлены на рис. 4. Далее выделяется первая гармоническая Φ_1 из кривой $\Phi(x)$. ЭДС фазы якорной обмотки синхронной машины определим по формуле

$$E_0 = \pi \sqrt{2} f \omega k_0 \Phi_1,$$

где k_0 — обмоточный коэффициент якорной обмотки синхронного двигателя.

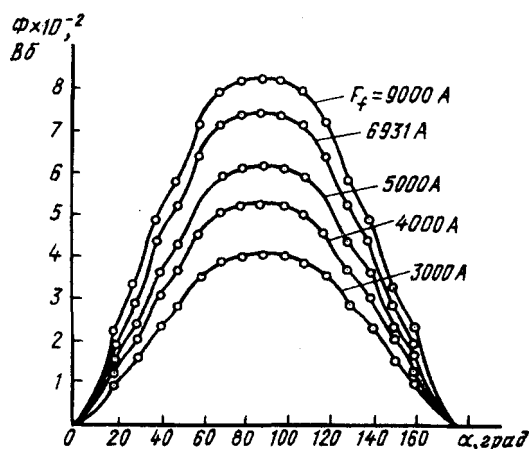


Рис. 4. Зависимость потока, сцепленного с катушками фазы якорной обмотки синхронного двигателя СДК2-16-44-10 КУХЛ4, от угла поворота ротора при различных значениях МДС обмотки возбуждения на холостом ходу, рассчитанная по методу проводимостей зубцовых контуров

Рассчитанное значение ЭДС холостого хода E_0 сравнивается с заданным номинальным напряжением U_n , после чего проводится корректировка значения тока холостого хода i_{f0} . Были получены характеристика холостого хода $E_0 = f(i_f)$ синхронного двигателя СДК2-16-44-10 КУХЛ4, рассчитанная на основе метода проводимостей зубцовых контуров, и характеристика холостого хода этого двигателя, рассчитанная по методике, используемой на Лысьвенском турбогенераторном заводе. На линейной части эти характеристики полностью совпадают. В насыщенной области данные, полученные по представленной методике, близко совпадают с данными, полученными с помощью методики Лысьвенского турбогенераторного завода.

Для тестирования разработанной программы было сделано сравнение потоков Φ_z и Φ_n , рассчитанных методом проводимостей зубцовых контуров и методом конечных элементов по программе MagNet [18].

Сравнения проводились для синхронного двигателя СДК2-16-44-10 КУХЛ4 при минимальном воздушном зазоре $\delta_{\min} = 3,7$ мм, числе пазов на полюс и фазу $q = 3$ и, соответственно, числе катушек якорной обмотки возбуждителя на полюсном наконечнике, равном шести.

Полученные авторами графики распределения нормальной составляющей индукции магнитного поля в зубцах индуктора на высоте 1/3 от основания зубца, рассчитанные методом проводимостей зубцовых контуров и методом конечных элементов, показали, что максимальная разница в значениях потока Φ_z не превышает 9,7%, а потока Φ_n — 6,5%; суммарная разница в значениях ЭДС фазы, рассчитанных этими методами, не превышает 5,5%.

На рис. 5 представлен график распределения

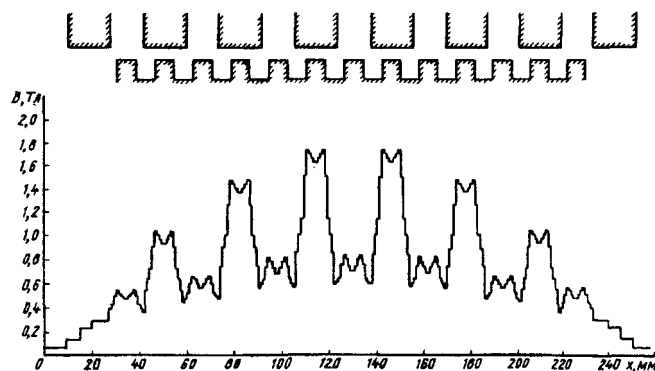


Рис. 5. Распределение индукции магнитного поля на поверхности полюсного наконечника исследуемого двигателя на холостом ходу

нормальной составляющей индукции магнитного поля на поверхности индуктора, полученный следующим образом. Удельная магнитная проводимость воздушного зазора

$$\lambda = \Phi / (\mu_0 l F),$$

где l — длина активной части машины.

Воспользуемся результатами расчета поля в воздушном зазоре, полученными методом конечных элементов. Известны значения нормальной составляющей индукции в треугольниках на поверхности индуктора (рис. 3) при заданных граничных условиях для скалярного потенциала магнитного поля U . Магнитная проводимость трубки потока шириной в один треугольник будет равна

$$\lambda = B_y l t / (\mu \mu_0 l F) = B_y t / (\mu \mu_0 F),$$

где t — шаг сетки треугольных элементов (рис. 3).

Граничные условия для скалярного потенциала магнитного поля задавалась таким образом, чтобы падение магнитного потенциала между поверхностями статора и ротора равнялось единице $U_1 - U_2 = 1$ и МДС воздушного зазора также равнялась единице $F = 1$. Тогда удельная магнитная проводимость трубки магнитного потока шириной в один треугольник равна

$$\lambda = B_y t / (\mu \mu_0) = \mu \mu_0 (\partial U / \partial y) t / (\mu \mu_0) = -(\partial U / \partial y) t.$$

Если значение МДС в воздушном зазоре отлично от единицы, то нормальная составляющая индукции в воздушном зазоре

$$B_y = \mu \mu_0 F \lambda / t.$$

Подставим в последнее выражение значение удельной магнитной проводимости воздушного зазора для трубки магнитного потока шириной, равной шагу сетки треугольных элементов, получим:

$$B_y = -\mu \mu_0 (\partial U / \partial y) F.$$

Значения производной $\partial U/\partial y$ могут быть определены для каждого треугольника каждой половины зубцового деления статора. Значения падения магнитного напряжения F на каждом магнитном сопротивлении воздушного зазора определяются в результате расчета магнитной схемы методом проводимостей зубцовых контуров.

Таким образом, метод проводимостей зубцовых контуров позволяет органически соединить результаты расчета поля в воздушном зазоре точным методом, например методом конечных элементов, с результатами расчета магнитной цепи машины.

Режим номинальной нагрузки. Для реализации требуемого установившегося режима с помощью пакета программ методом проводимостей зубцовых контуров необходимо знать значения угла нагрузки, МДС обмотки якоря в пазах и МДС возбуждения.

Угол нагрузки и МДС обмотки возбуждения при нагрузке рассчитывались для заданных значений полезной мощности P_2 , линейного напряжения U и $\cos \varphi$. Для обычных режимов работы синхронной машины, например параллельной работы с мощной сетью, значения напряжения и тока синхронной машины можно считать синусоидальными. В этом случае значения угла нагрузки θ можно определить с помощью векторной диаграммы напряжений синхронной машины [16].

Полученные значения МДС обмотки возбуждения, угла нагрузки, ЭДС якорной обмотки от результирующего поля по продольной оси E_{rd} и первой гармонической МДС реакции якоря являются исходными данными для расчета поля методом проводимостей зубцовых контуров. Практика электромашиностроения показывает, что при насыщении значения сопротивлений по продольной и поперечной осям $x_{dн}$ и $x_{qн}$, угла нагрузки, ЭДС якорной обмотки от результирующего поля по продольной оси E_{rd} определяются по общепринятым методикам [16, 17] с достаточной степенью точности. Будем считать их окончательно определенными. Значение МДС обмотки возбуждения будем корректировать по значениям ЭДС якорной обмотки от результирующего поля по продольной оси E_{rd} .

Был принят следующий алгоритм расчета номинального режима синхронного двигателя, ЭДС, параметров, максимальной мощности и коэффициента запаса по мощности совмещенного индукторного возбудителя:

1. Был сделан предварительный расчет по методике, изложенной в [17].
2. Рассчитывалась характеристика холостого хода методом проводимостей зубцовых контуров.
3. По методике [16] определялась МДС об-

мотки возбуждения для номинальной нагрузки F_{fn} и значение тока возбуждения для номинального режима i_{fn} . Рассчитывались ЭДС якорной обмотки, наведенной результирующим полем по продольной оси E_{rd} , и угол нагрузки в номинальном режиме θ_n .

Если полученные значения параметров, перегрузочной способности по какой-либо причине не устраивают пользователя, то можно изменить число эффективных проводников в пазу u_p и число витков в фазе якорной обмотки w_1 , после чего снова рассчитать режим холостого хода по п. 2 и повторить расчет по п. 3 и так далее.

4. Полученные значения МДС обмотки возбуждения под нагрузкой, ЭДС E_{rd} и угла нагрузки θ_n были исходными для программы расчета поля в машине методом проводимостей зубцовых контуров. На основе полученного значения угла нагрузки по первой гармонической МДС определялось распределение МДС по пазам статора. Рассчитывалась магнитная цепь с полученным в п. 3 значением МДС обмотки возбуждения в номинальном режиме. Значение ЭДС якорной обмотки синхронного двигателя от результирующего поля по продольной оси E_{rd} , полученное в п. 3, принималось за базовое значение этой ЭДС. Проводилось сравнение рассчитанного на основе метода проводимостей зубцовых контуров значения ЭДС E_{rd} с базовым. При необходимости значение МДС обмотки возбуждения корректировалось до достижения заданной точности.

Полученное значение МДС обмотки возбуждения являлось исходным для программы расчета поля при другом положении статора относительно ротора. В результате комплекса программ, разработанного на кафедре электрических машин Уральского государственного технического университета, формировались файлы данных потоков в зубцах индуктора для номинального режима (Φ_{zi} и Φ_{pi}).

5. На основе значений потоков Φ_{zi} и Φ_{pi} в зубцах индуктора определялось выпрямленное значение напряжения холостого хода якорной обмотки возбудителя:

$$U_{d0} = \beta_u E_\Phi = \beta_u \pi \sqrt{2} f w p k_0 k_r \sum_{i=1}^N (\Phi_{zi} - \Phi_{pi}),$$

где β_u — коэффициент усиления по напряжению четырехфазного мостового преобразователя [19]; E_Φ — ЭДС холостого хода фазы якорной обмотки совмещенного индукторного возбудителя.

Далее рассчитывались значения параметров катушек и определялось выпрямленное значение тока короткого замыкания:

$$I_{dk} = \beta_i E_\Phi / x_\Phi,$$

где β_i — коэффициент усиления по току четырехфазного мостового преобразователя [19]; $x_{\text{ф}}$ — индуктивное сопротивление фазы якорной обмотки совмещенного индукторного возбuditеля.

По МДС возбуждения в номинальном режиме определялось число витков обмотки возбуждения. Определялось сечение провода обмотки возбуждения, проверялось: вписывается ли обмотка возбуждения в межполюсное окно? Затем находилась мощность возбуждения в номинальном режиме $P_{\text{вн}}$, рассчитывались максимальная мощность возбuditеля $P_{\text{вт}}$ по его спрямленной внешней характеристике [3] и коэффициент запаса по мощности возбuditеля с учетом двойной форсировки по току и напряжению:

$$k_{\text{рив}} = P_{\text{вт}} / (4P_{\text{вн}}).$$

На основе предложенного алгоритма было рассчитано электромагнитное поле методом проводимостей зубцовых контуров для номинального режима двигателя СДК2-16-44-10 КУХЛ4. На рис. 6 приведен график распределения нормальной составляющей индукции на поверхности полюсного наконечника при номинальной нагрузке ($\theta_{\text{н}} = 18,6^\circ$). Номинальная составляющая индукции рассчитана на основе комбинации метода конечных элементов и метода проводимостей зубцовых контуров. Кривая распределения индукции на холостом ходу (рис. 5) построена для тока возбуждения $i_{\text{ф0}}$ и, как и следовало ожидать, симметрична относительно оси полюса. Кривая распределения индукции под нагрузкой (рис. 6) несимметрична. В соответствии с общей теорией синхронных машин за счет поля поперечной реакции якоря произошло увеличение индукции под одним краем полюса и уменьшение под другим. Особенностью метода проводимостей зубцовых контуров является то, что окончательный результат получается естественным образом, без наложения полей по продольной и поперечной осям, с учетом неравномерности воз-

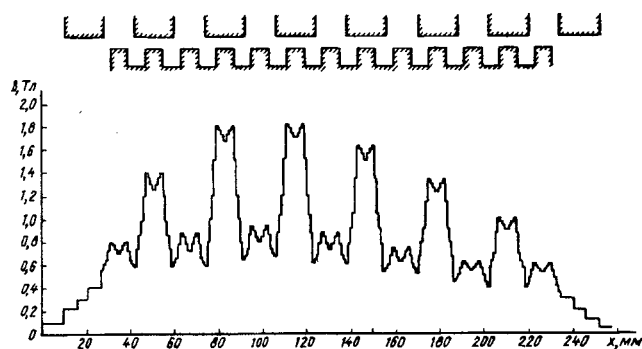


Рис. 6. Распределение индукции магнитного поля на поверхности полюсного наконечника исследуемого двигателя при номинальной нагрузке

душного зазора и насыщения всех участков магнитной цепи. В результате расчета пользователь получает подробную информацию о магнитном поле на всех участках магнитной цепи. Возможность получить подробную информацию о состоянии магнитной цепи при любой нагрузке, рассчитать интегральные характеристики машины при относительно небольших затратах времени делает метод проводимостей зубцовых контуров универсальным и в настоящее время одним из основных для детального исследования установившихся режимов электрических машин.

Поскольку полем возбуждения совмещенного индукторного возбuditеля является зубцовая составляющая результирующего поля в воздушном зазоре, то максимальная мощность, которая может быть отдана возбuditелем в нагрузку (обмотку возбуждения синхронного двигателя), зависит как от режима работы двигателя, так и геометрических размеров зубцовой зоны якоря и индуктора. На первом этапе проектирования комплекса «синхронный двигатель — совмещенный индукторный возбuditель» решаются следующие задачи:

проектируется синхронный двигатель с учетом размещения на полюсном наконечнике якорной обмотки индукторного возбuditеля;

на полюсном наконечнике размещается якорная обмотка возбuditеля;

для всех эксплуатационных режимов проверяется минимальная кратность форсировки, которую может обеспечить возбuditель;

если минимальное значение кратности форсировки больше заданного и обеспечиваются все технические требования, то расчет заканчивается;

если минимальное значение рассчитанной кратности форсировки меньше заданной, то необходимо выполнить другой этап проектирования — изменить геометрию зубцовой зоны синхронного двигателя (уменьшить, если это возможно по условиям статической устойчивости, воздушный зазор или сделать его равномерным, изменить число пазов на полюс и фазу, увеличить ширину полюсного наконечника).

С учетом вышесказанного исследовалось влияние числа зубцов на полюс и фазу и воздушного зазора на максимальную мощность, которую совмещенный индукторный возбuditель может отдать в нагрузку.

Анализ исследований показывает, что совмещенный бесщеточный индукторный возбuditель обеспечивает двойную форсировку по току и по напряжению двигателя без пусковой обмотки для воздушного зазора, равного зазору базового двигателя СДК2-16-44-10 КУХЛ4 ($\delta_{\text{мин}} = 3,7$ мм). Для двигателя с пусковой обмоткой совмещенный бесщеточный индукторный возбuditель

обеспечивает указанную кратность форсировки при $\delta_{\min}=3$ мм.

Максимальная мощность совмещенного индукторного возбудителя существенно зависит от выбранного числа пазов на полюс и фазу q возбуждаемой синхронной машины при неизменном значении внутреннего диаметра статора. Так, для двигателя без пусковой обмотки с воздушным зазором $\delta_{\min}=3$ мм и коэффициентом насыщения магнитной цепи k_{za} , близком к 1,115, при уменьшении q с 4 до 2 максимальная мощность увеличилась в 1,929 раза, а для двигателя с пусковой обмоткой — в 2,08 раза. Для вариантов двигателя с большим насыщением магнитной цепи при k_{za} , близком к 1,2, эти же цифры будут соответственно 1,83 и 1,97.

Режим регулирования активной мощности при постоянном токе возбуждения. Резервы мощности возбудителя оценивались в случае регулирования активной мощности от нуля до предела статической устойчивости при работе синхронной машины параллельно с мощной сетью при постоянном возбуждении.

Предел статической устойчивости явнополюсной синхронной машины определялся как экстремальное значение функции активной мощности. Исходные данные для расчета поля методом проводимостей зубцовых контуров можно определить из векторной диаграммы для данного режима по методике [16]. Известными являются активная мощность P , фазное напряжение U , ток возбуждения i_f и ЭДС E . Неизвестны угол нагрузки θ , $\cos \varphi$ и ток якоря I . Угол нагрузки при заданных активной мощности, ЭДС E и фазном напряжении U определяется из решения тригонометрического уравнения, полученного из уравнения для активной мощности. По найденному значению угла нагрузки определялись значения тока якоря по продольной и поперечной осям, модуль вектора тока и углы ψ и φ .

По полученным значениям токов и углов нагрузки рассчитывалась магнитная цепь с помощью метода проводимостей зубцовых контуров.

Алгоритм расчета режима регулирования активной мощности при постоянном токе возбуждения приводится ниже:

1. Определяются параметры, значения полезной мощности, углов нагрузки, $\cos \varphi$ при постоянном токе возбуждения.

2. Рассчитывается магнитная цепь машины во всех точках данного режима для двух положений ротора относительно статора; формируются файлы значений потоков Φ_{zi} и Φ_{pi} для каждого зубца индуктора.

3. Рассчитываются ЭДС фазы якорной обмотки совмещенного индукторного возбудителя

и выпрямленное напряжение холостого хода U_{d0} для всех точек данного режима, определяются выпрямленное значение тока короткого замыкания I_{d0} , максимальная мощность возбудителя и коэффициент запаса по мощности для всех точек режима.

Данные исследуемых режимов для двигателя СДК-16-44-10 КУХЛ4 следующие:

№ режима	P_2 , кВт	Угол нагрузки θ , град	$\cos \varphi$	Угол φ , град	Угол ψ , град	Ток статора I_a , А
1	154,9	4,0	0,235	76,4	99,57	68,93
2	309,8	8,1	0,448	63,36	108,55	72,27
3	464,6	12,2	0,626	51,23	116,52	77,61
4	619,5	16,6	0,765	40,12	123,32	84,74
5	774,4	21,1	0,867	29,93	128,98	93,46
6	840,0	23,1	0,9	25,84	131,05	97,62
7	929,3	26,0	0,937	20,43	133,6	103,73
8	1084,2	31,4	0,981	11,32	137,3	115,64
9	1239,6	37,6	0,999	2,1	140,27	129,68
10	1393,9	45,7	0,99	-8,17	142,5	147,29
11	1548,8	65,2	0,877	-28,66	143,45	184,61

(Номинальный режим: $P_2=840$ кВт; $\cos \varphi=0,9$; $I_{aH}=97,62$ А; $i_{fH}=294,78$ А; $\delta=3$ мм.)

На рис. 7 изображены графики распределения индукции в воздушном зазоре для минимального угла нагрузки и при его значении, равном критическому. Индукция рассчитана по магнитной схеме замещения делением магнитного потока

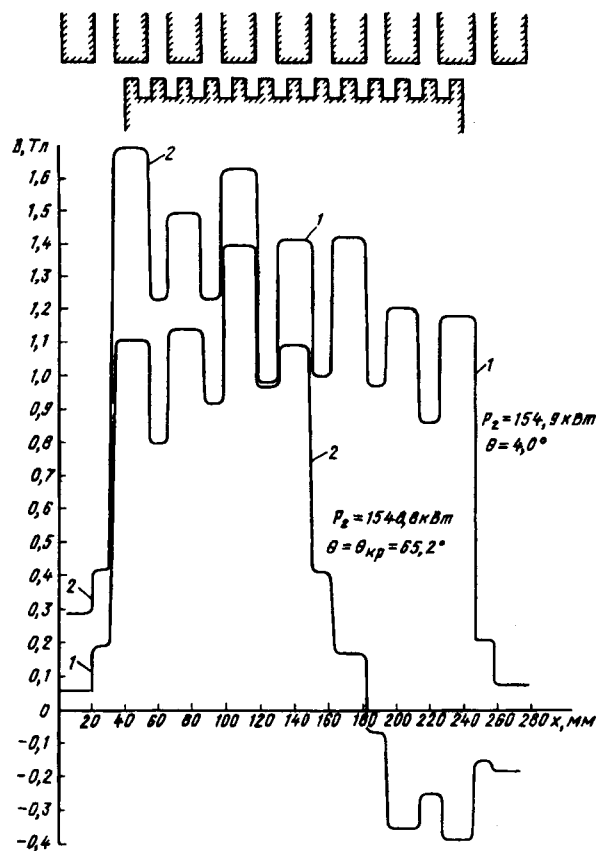


Рис. 7. Распределение индукции в воздушном зазоре в режиме регулирования активной мощности при постоянном токе возбуждения

на участках магнитной цепи в воздушном зазоре на площадь соответствующего участка. Из графика видно, что для данного синхронного двигателя при больших углах нагрузки происходит «опрокидывание» поля на одном из краев полюсного наконечника.

График зависимости коэффициента запаса совмещенного индукторного возбудителя по мощности, рассчитанного по формуле

$$k_{\text{рив}} = P_{\text{вт}}/P_{\text{вн}},$$

в функции угла нагрузки $k_{\text{рив}}=f(\theta)$ для $\delta_{\text{мин}}=3,7$ мм показал, что возбудитель обеспечивает двойную форсировку во всем диапазоне изменения активной нагрузки от холостого хода до предела статической устойчивости при отсутствии пусковой обмотки. При наличии пусковой обмотки двигатель обеспечивает кратность форсировки 1,8 по току и по напряжению в диапазоне изменения угла нагрузки от нуля до 25° . Минимальная кратность форсировки в этом случае наблюдается при угле нагрузки 45° и равняется 1,57. Заметим, что $k_{\text{рив}}=1,57$ означает, что возбудитель в данном режиме может отдать в обмотку возбуждения мощность, в 1,57 раз большую, чем требуется. Управление током возбуждения осуществляется изменением угла управления вращающегося тиристорного преобразователя. В случае перевода вращающегося тиристорного преобразователя в «диодный» режим работы произойдет самовозбуждение возбудителя, причем кратность форсировки по мощности будет больше числа 1,57.

Режим регулирования реактивной мощности при постоянной активной мощности. В процессе регулирования реактивной мощности по U-образным характеристикам определим запас по мощности возбудителя k_p . Исходные данные для расчета режима определим следующим образом. По заданной активной мощности находим активную составляющую тока якоря

$$I_a = P/mU.$$

Определяем значение угла нагрузки на пределе статической устойчивости $\theta_{\text{кр}}$. Задаемся значением угла φ и находим модуль вектора тока

$$I = I_a / \cos \varphi.$$

Находим ЭДС от результирующего поля в воздушном зазоре

$$E_\delta = \sqrt{(U \sin \varphi + x_\sigma I)^2 + (U \cos \varphi)^2}.$$

По значению E_δ и магнитной характеристике определяем коэффициент насыщения магнитной цепи, соответствующий данному режиму,

$k_{za}=F_\delta/F_1$. Зная k_{za} , определяем коэффициенты ξ_d и ξ_q [16]. Определяем насыщенные значения индуктивностей по продольной и поперечной осям. Находим ЭДС от суммарного поля по продольной оси

$$E_{rd} = \sqrt{E^2 + (x_{aqn} I_q)^2},$$

определяем ЭДС

$$E = E_{rd} + x_{adn} I_d.$$

По характеристике холостого хода находим значения МДС и тока возбуждения:

$$i_f = (E/E_\delta) i_{f0}.$$

Расчетные данные режима регулирования тока возбуждения при постоянной активной мощности (U-образная характеристика) двигателя СДК2-16-44-10 КУХЛ4 для номинальной нагрузки $P_2=840$ кВт следующие:

i_f А	I_1 А	$\cos \varphi$ отн. ед.	φ , град	E_δ , В	x_{adn}^* отн. ед.	x_{eqn}^* отн. ед.	θ , град
143,8	114,7	0,766	-40,0	3235,3	1,467	0,799	61,1
153,4	101,5	0,866	-30,0	3310,4	1,459	0,782	49,8
170,2	93,5	0,94	-20,0	3371,6	1,453	0,768	42,7
189,9	89,2	0,985	-10,0	3425,3	1,447	0,756	37,7
213,5	87,7	1,0	0,0	3476,1	1,435	0,73	33,3
238,0	88,6	0,991	7,5	3513,8	1,41	0,675	29,4
266,6	90,9	0,966	15,0	3552,9	1,384	0,644	26,7
294,8	97,6	0,9	25,8	3594,9	1,357	0,613	23,1
337,7	101,4	0,866	30,0	3641,8	1,329	0,578	21,8

(Значения $P_2=840$ кВт, $U_N=3464,1$ В.)

Алгоритм расчета данного режима:

1. Рассчитываются насыщенные значения параметров x_{dn} и x_{qn} , $\cos \varphi$, угла нагрузки для режима U-образной характеристики.

2. Рассчитывается электромагнитное поле синхронной машины при двух положениях статора относительно ротора для всех точек исследуемого режима. По результатам расчета формируются файлы значений потоков Φ_z и Φ_n для каждого зубца индуктора в каждой точке исследуемого режима.

3. Рассчитывается ЭДС холостого хода фазы и выпрямленное значение напряжения холостого хода U_{d0} якорной обмотки совмещенного индукторного возбудителя для всех точек режима. Определяются значения параметров фазы, выпрямленное значение тока короткого замыкания I_{d0} якорной обмотки совмещенного индукторного возбудителя для всех точек режима, максимальная мощность $P_{\text{вт}}$ и коэффициент запаса по мощности совмещенного индукторного возбудителя.

На рис. 8 представлены графики распределения индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке и в точке, близкой к пределу

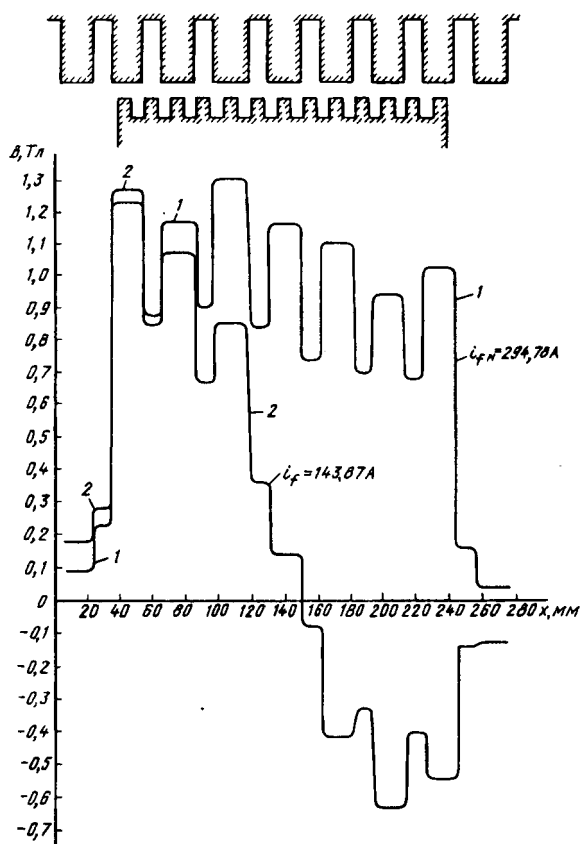


Рис. 8. Распределение индукции в воздушном зазоре в режиме регулирования реактивной мощности при постоянной активной мощности

статической устойчивости.

График зависимости коэффициента запаса по мощности от тока возбуждения при постоянной мощности на валу двигателя показал, что при большом недо возбуждении происходит существенное снижение мощности совмещенного индукторного возбудителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 578807 (СССР). Синхронная электрическая машина с возбуждением от высших гармоник / А.Т. Пластун. — Оpubл. в БИ, 1982, № 27.
2. Пластун А.Т., Денисенко В.И., Рябенко Е.И. и др. Синхронный двигатель с совмещенным индукторным возбудителем. — Электротехника, 1994, № 9.
3. Пульников А.А., Пластун А.Т., Денисенко В.И., Фриман Э.М. О применении совмещенного индукторного возбудителя в бесщеточной системе возбуждения явнополюсных синхронных двигателей. — Электричество, 1996, № 3.
4. Пластун А.Т. Бесщеточные совмещенные возбудительные устройства синхронных машин. (Обобщение теории, разработка и применение). — Автореф. дис. доктора техн. наук. Свердловск, 1985.
5. Денисенко В.И., Пластун А.Т. Упрощенная математическая модель совмещенного многофункционального бесщеточного возбудителя. Современные проблемы энергетики, электромеханики и электротехнологии, ч. 2. — Екатеринбург: Вестник УГТУ, 1995.
6. Гольмаков Ю., Лошкарёв В., Денисенко В. и др. Совмещенный многофункциональный бесщеточный возбудитель. Материалы научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения видного украинского ученого-электромеханика Тихона Губенко. Львов, 1996.

7. Глебов И.А. Системы возбуждения синхронных генераторов с управляемыми преобразователями. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.
8. Глебов И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин. — Л.: Наука, 1979.
9. Глебов И.А. Электромагнитные процессы системы возбуждения синхронных машин. — Л.: Наука, 1987.
10. Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. — Л.: Наука, 1988.
11. Пульников А.А. Математические модели и методы расчета совмещенных бесщеточных индукторных возбудителей синхронных двигателей. — Автореф. дис. доктора техн. наук. Екатеринбург, 1997.
12. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Власов А.И., Кузнецов В.А. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
13. Бармин О.А., Денисенко В.И., Пульников А.А., Белугин В.В. Некоторые результаты экспериментального исследования совмещенного бесщеточного индукторного возбудителя на физической модели / Исследование параметров и характеристик электрических машин переменного тока. Межвузовский сборник научных трудов. — Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М.Кирова, 1983.
14. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. — М.: Мир, 1986.
15. Дарьин А.Г., Иванов-Смоленский А.В. Расчет проводимостей зубцовых контуров методом конечных элементов. — Труды ВНИПНИЭМ, 1982.
16. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980.
17. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. — М.: Энергия, 1980.
18. Magnet User Guide. Published by Infolytica Corporation, Montreal, 1988.
19. Карташов В.Н., Липанов В.М. Внешние характеристики и расчетные коэффициенты четырехфазных схем выпрямления / Исследование параметров и характеристик электрических машин переменного тока. Межвузовский сборник. — Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М.Кирова, 1983.

[23.04.98]

Авторы: Пульников Андрей Афанасьевич окончил электротехнический факультет Уральского политехнического института (УПИ) в 1976 г. Докторскую диссертацию на тему «Математические модели и методы расчета совмещенных бесщеточных индукторных возбудителей синхронных двигателей» защитил в 1997 г. в Уральском государственном техническом университете (УПИ). Профессор кафедры электрических машин УГТУ.

Пластун Анатолий Трофимович окончил электротехнический факультет УПИ в 1961 г. Докторскую диссертацию на тему «Бесщеточные совмещенные возбудительные устройства синхронных машин (Обобщение теории, разработка и применение)» защитил в 1986 г. в УПИ. Заведующий кафедрой электрических машин УГТУ.

Денисенко Виктор Иванович окончил электротехнический факультет УПИ в 1962 г. Кандидатскую диссертацию на тему «Исследования и расчет перенапряжений на вентильях в системах фазового компаундирования в асинхронных режимах синхронного генератора» защитил в 1971 г. в УПИ. Профессор кафедры электрических машин УГТУ.

Математическая модель асинхронного явнополюсного конденсаторного двигателя на основе метода зубцовых контуров

МАРТЫНОВ В.А., ЛАБУТИН А.А.

Описывается применение универсального метода расчета электромагнитных процессов в электрических машинах к расчету различных режимов асинхронных явнополюсных конденсаторных микродвигателей. Приведено сравнение расчетных и экспериментальных данных для двигателя мощностью 10 Вт.

Ключевые слова: метод зубцовых контуров, электромагнитные расчеты, магнитное поле, расчет

Асинхронные явнополюсные конденсаторные двигатели (АКДЯ) являются наиболее перспективными для использования в бытовых приборах с вентиляторной нагрузкой. Они имеют высокие энергетические показатели, отличаются простотой конструкции и высокой технологичностью [3]. При внутренних диаметрах статора менее 40 мм эти двигатели имеют особые преимущества, так как обмоточные работы у двигателей с распределенной обмоткой при этих габаритах не поддаются механизации. Среди множества исполнений АКДЯ наиболее технологичной является конструкция с составным статором (рис. 1), состоящим из крестовины и ярма [3].

Для электромагнитных расчетов конденсаторных двигателей чаще всего используются математические модели на основе метода симметричных составляющих. Однако эти модели базируются на довольно грубых допущениях, основными из которых являются:

процессы электромеханического преобразования энергии определяются главным образом основной гармонической поля в зазоре;

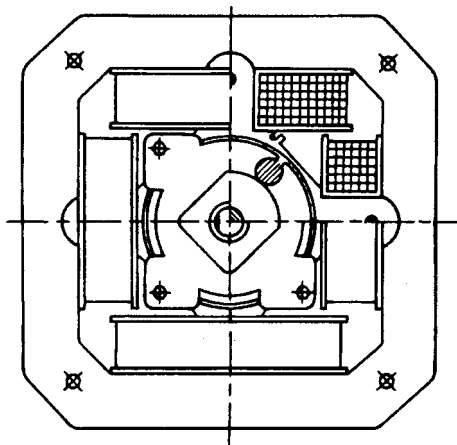


Рис. 1. Конструкция АКДЯ

A universal method of analyzing the electromagnetic processes in electrical machines, as applied to the analysis of various conditions of salient-pole induction capacitor micromotors is described. Comparison of the calculated and experimental results obtained for a 10 W motor is given.

Key words: tooth circuit method, electromagnetic analysis, magnetic field, analysis

зубчатые поверхности сердечников магнитопровода заменяются на гладкие с зазором, эквивалентным по униполярному полю;

главное поле и поля рассеяния рассматриваются независимо друг от друга.

Метод симметричных составляющих базируется на символическом (комплексном) методе, который предполагает синусоидальность формы токов в ветвях АКДЯ, и методе наложения (суперпозиции), который применим только к линейным системам.

В однофазных двигателях наличие конденсатора приводит к искажению формы токов в ветвях, что подтверждается расчетными и экспериментальными кривыми, и использование символического метода здесь требует особой осторожности.

Рассматриваемый АКДЯ имеет ферромагнитный шунт (рис. 1), соединяющий полюса различной полярности. Степень насыщения этого шунта, зависящая от режима работы машины, определяет соотношение между главным полем, пересекающим зазор, и полем рассеяния, замыкающимся между полюсами. Поэтому использование метода симметричных составляющих, который не учитывает изменение насыщения магнитной цепи или учитывает его весьма приближенно, может привести к недопустимо большой погрешности расчета статических характеристик.

Метод симметричных составляющих неприменим к расчету электромагнитных переходных процессов, при которых правильный учет насыщения шунта еще более важен, чем в установившихся режимах.

Приемлемая точность результатов при расчете по существующим моделям достигается введением поправочных коэффициентов. Но в случае конструкции АКДЯ с составным статором на-

копленных экспериментальных и расчетных данных не хватает для получения зависимостей поправочных коэффициентов, которые могут быть использованы при решении задач с необходимой точностью.

В этой статье предлагается математическая модель электромагнитного расчета АКДЯ на основе метода зубцовых контуров (МЗК) с использованием расчета схемы замещения электромагнитного поля насыщенной электрической машины по заданным потокоцеплениям ее электрических ветвей. Применение этого метода позволяет с высокой степенью точности проектировать и исследовать насыщенные электрические машины в переходных режимах [4], а также дает возможность учитывать и анализировать целый ряд явлений и конструктивных особенностей, влияющих на механические и энергетические показатели, среди которых: наличие сильно насыщенных элементов магнитной цепи и наличие емкости в одной из фаз электрической цепи, технологические зазоры и зубчатость сердечников, вытеснение тока в стержнях короткозамкнутого ротора и изменение конфигурации поля при вращении ротора.

Использование МЗК в совокупности с расчетом схемы замещения электромагнитного поля АКДЯ по заданным потокоцеплениям ее электрических ветвей предполагает введение ряда допущений, которые не оказывают заметного влияния на точность получаемых результатов:

двухмерное магнитное поле в активной зоне машины рассматривается независимо от трехмерного поля в зоне лобовых частей;

трехмерное поле в зоне лобовых частей и индуктивные параметры, которые ему соответствуют, определяются при бесконечно большой магнитной проводимости сердечников;

двухмерное поле рассеяния немагнитных зон статора рассматривается независимо от магнитного поля в активной зоне двигателя;

неоднородность структуры по продольной оси учитывается введением расчетных аксиальных длин магнитопровода и зазора.

На рис. 2 представлен фрагмент схемы замещения магнитной цепи АКДЯ. Приняв допущение о том, что в зубцах имеет место лишь радиальная, а в ярме и магнитном шунте только тангенциальная составляющие магнитного поля, разобьем магнитный шунт на ряд элементов с одинаковой длиной по окружности. Каждый элемент зубцов, магнитного шунта и ярма представляется на схеме замещения нелинейной проводимостью, для которой рассчитывается вебер-амперная характеристика по известной кривой намагничивания стали. Параметры проводимостей взаимной индукции этих элементов в сторону

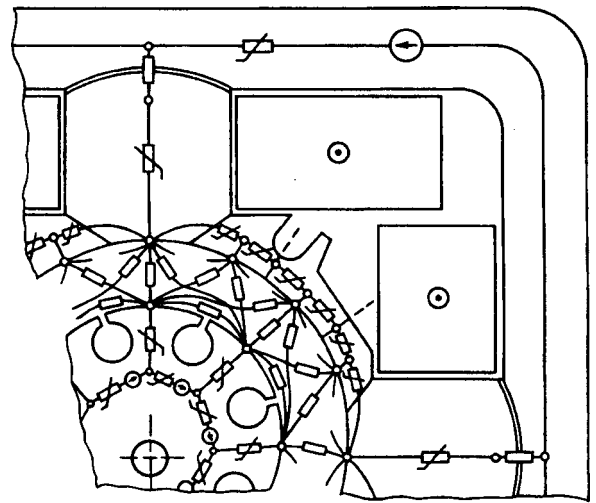


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи АКДЯ

зазора определяются по МЗК [2].

Идея МЗК состоит в разбиении двумерной области поля электрической машины на ряд мелких подобластей, в каждой из которых поле может быть рассчитано одним из известных численных методов. При традиционном использовании МЗК реальные токи распределенных обмоток заменяются токами зубцовых контуров, а поверхность каждого зубца, обращенная к зазору, считается эквипотенциалью скалярного магнитного потенциала. В рассматриваемом двигателе статор гладкий с плавным изменением значения магнитного потенциала от одного полюса к другому за счет падения магнитного напряжения в шунте. Для использования МЗК вся поверхность гладкого сердечника статора, обращенная к зазору, разбивается на элементарные поверхности. При этом считается, что в пределах каждой элементарной поверхности магнитный потенциал принимает некоторое усредненное значение, т.е. от плавного изменения магнитного потенциала в тангенциальном направлении переходят к ступенчатому. Чем больше таких элементарных поверхностей, эквивалентных зубцовым контурам традиционной машины, тем точнее будет расчет. Такое поле рассчитывается при особом образе назначенных граничных условиях, уменьшающих размеры его зоны до нескольких элементарных поверхностей. Совокупность магнитных полей от токов элементарных поверхностей дает в сумме полное магнитное поле в активной зоне, включающее как главное поле, так и поля пазового и дифференциального рассеяния.

Магнитные проводимости взаимной индукции между контурами статора и ротора являются наиболее важными параметрами схемы замещения магнитной цепи. Зависимостями этих проводи-

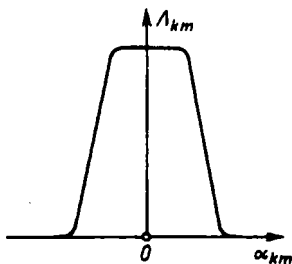


Рис. 3. Зависимость магнитной проводимости взаимной индукции между контуром на статоре K и контуром на роторе m от угла перемещения ротора $\Lambda_{km}=f(\alpha_{km})$

мостей от углового положения ротора (рис. 3)

$$\Lambda_{km} = f(\alpha_{km}) \quad (1)$$

определяются ЭДС вращения и электромагнитные моменты, действующие на статор и ротор машины, и, следовательно, сам процесс электромеханического преобразования энергии в машине. Наиболее точно кривая проводимостей взаимной индукции между контурами статора и ротора (1) может быть получена на основе численного расчета магнитного поля возбужденного зубцового контура K и определения по результатам этого расчета потока, сцепленного с контуром другого сердечника. Однако такие численные расчеты трудоемки, а поскольку АКДЯ — машина с односторонней зубчатостью, то для расчета кривых (1) можно воспользоваться аналитическим методом. Это позволит, не теряя точности и не увеличивая объема вычислений, определение $\Lambda_{km}(\alpha_{km})$ ввести непосредственно в программу поверочного расчета АКДЯ.

Исходными данными для определения зависимости (1) являются: зубцовое деление сердечника ротора t_{z20} ; длина элемента разбиения статора по окружности t_{z10} ; ширина паза ротора $b_{п20}$; воздушный зазор δ_0 ; внутренний диаметр статора D_1 .

Магнитное поле возбужденного контура должно быть рассчитано при так называемых особых граничных условиях, когда скалярный магнитный потенциал зубца Ψ_k , охваченный током i_k , равен этому току $\Psi_k=i_k$, а потенциалы всех остальных зубцов статора и ротора принимаются равными нулю $\Psi=0$ [5]. Причем магнитная проницаемость сердечников статора и ротора считается бесконечно большой $\mu_c=\infty$. Поле зубцового контура рассчитывается аналитически с помощью метода конформного преобразования. Кольцевой зубчатый зазор, заданный в комплексной плоскости $t'=u'+jv'$, превращается в комплексной плоскости $z'=x'+jy'=re^{ja}$ в полосовой зубчатый зазор при использовании конформного преобразования:

$$z' = x' + jy' = jk \ln(r) - k\alpha; \quad (2)$$

$$x' = -k\alpha; \quad (3)$$

$$y' = k \ln(r), \quad (4)$$

где коэффициент преобразования

$$k = \delta_0 / \ln(D_1 / (D_1 - 2\delta_0)). \quad (5)$$

Выражение для коэффициента преобразования вытекает из условия необходимости равенства воздушных зазоров в комплексных областях t' и z' :

$$\delta_0 = \delta' = k \ln(D_1 / (D_1 - 2\delta_0)). \quad (6)$$

Теперь можно выразить все необходимые размеры полосового зубчатого зазора в плоскости z' через размеры кольцевого зазора в плоскости t' : длина контура статора;

$$t_{z1} = 2kt_{z10}/D_1; \quad (7)$$

зубцовое деление ротора

$$t_{z2} = kt_{z20}/(D_1/2 - \delta_0); \quad (8)$$

ширина паза ротора

$$b_{п2} = 2kb_{п20}/D_1. \quad (9)$$

После этого в комплексную плоскость z' должны быть перенесены без изменения граничные условия, заданные в исходной комплексной плоскости t' . Скалярный потенциал возбужденного зубца K должен быть равен току i_k , охватывающему этот зубец $\Psi_k=i_k$, а потенциалы всех остальных зубцов статора и ротора равны нулю $\Psi=0$. Для задания таких граничных условий необходимо сохранить в сердечниках бесконечно большую магнитную проницаемость $\mu_0=\infty$ и распространить зубчатый полосовой зазор на бесконечно большое расстояние влево и вправо от возбужденного зубца.

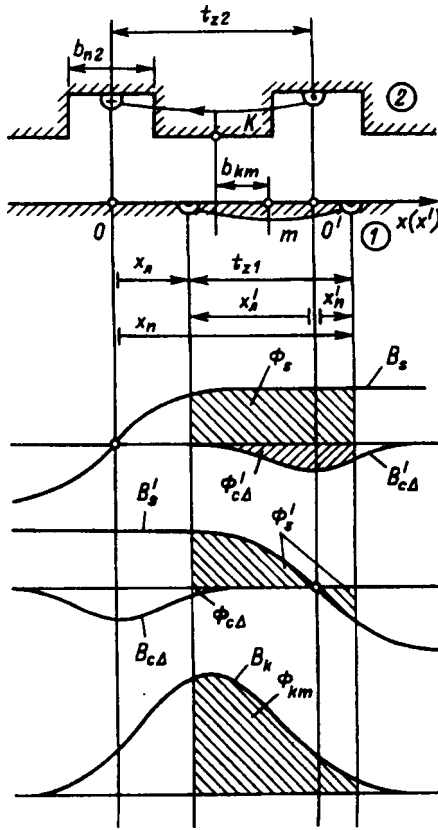
Все пазы конечной глубины, имеющие у зазора ширину $b_{п2}$, заменяем бесконечно глубокими пазами, имеющими такую же ширину.

Теперь поле зубцового контура K может быть найдено аналитически с помощью еще одного конформного преобразования. Нелинейное уравнение области паза можно решить, например, с помощью метода деления интервала пополам.

Как видно из рис. 4, индукция B_k складывается из четырех индукций на гладкой поверхности 1-го сердечника:

$$B_k = B_s + B'_s + B_{c\Delta} + B'_{c\Delta}, \quad (10)$$

где B_s — индукция нечетного поля, образованного током i_k в левом пазу, B'_s — индукция нечетного поля, образованного током $(-i_k)$ в правом пазу; $B_{c\Delta}$ — уменьшение индукции B'_s за счет влияния левого паза; $B'_{c\Delta}$ — уменьшение индукции B_s

Рис. 4. К расчету зависимости $\Lambda_{km}=f(a_{km})$

за счет влияния правого паза.

Индукция B_s обладает нечетной симметрией относительно точки O на оси левого паза, поэтому в произвольной точке на расстоянии X от начала отсчета в точке O имеем:

$$B_s = P\Psi_{sm} \sqrt{(t-a_1)/(t+1)}/\delta', \quad (11)$$

где

$$\Psi_{sm} = i_k/2; \quad (12)$$

$$a_1 = 2\delta'/b_{n2}; \quad (13)$$

$$t = f(ABS(X)); \quad (14)$$

$$P = -1, \text{ если } X < 0;$$

$$P = 1, \text{ если } X \geq 0.$$

Индукция B'_s обладает нечетной симметрией относительно точки O' на оси правого паза, поэтому в произвольной точке на расстоянии X' от начала отсчета в точке O' имеем:

$$B'_s = P\Psi_{sm} \sqrt{(t'-a_1)/(t'+1)}/\delta', \quad (15)$$

где

$$t' = f(ABS(X')); \quad (16)$$

$$P = 1, \text{ если } X' < 0,$$

$$P = -1, \text{ если } X' \geq 0.$$

Индукция $B_{c\Delta}$ обладает четной симметрией относительно точки O на оси левого паза, поэтому в произвольной точке на расстоянии X от начала отсчета в точке O имеем:

$$B'_{c\Delta} = -\Psi_{sm} (1 - \sqrt{t/(t+1)})/\delta'. \quad (17)$$

Индукция $B'_{c\Delta}$ обладает четной симметрией относительно точки O' на оси правого паза, поэтому в произвольной точке на расстоянии X' от начала отсчета в точке O' имеем:

$$B'_{c\Delta} = -\Psi_{sm} (1 - \sqrt{t'/(t'+1)})/\delta'. \quad (18)$$

Теперь можно определить проводимость взаимоиנדукции между зубцовым контуром K и зубцовым контуром m , ось которого смещена на расстояние b_{km} относительно контура K . Выразим координаты левой и правой сторон контура относительно начала отсчета в точках O и O' :

$$X_{\Lambda} = (t_{z2} + t_{z1})/2 + b_{km}; \quad (19)$$

$$X_{\Pi} = (t_{z2} - t_{z1})/2 + b_{km}; \quad (20)$$

$$X'_{\Lambda} = b_{km} - (t_{z2} + t_{z1})/2; \quad (21)$$

$$X'_{\Pi} = b_{km} - (t_{z2} - t_{z1})/2. \quad (22)$$

Зная координаты левой и правой сторон контура m , можно найти потоки от индукций $B_s, B'_s, B_{c\Delta}, B'_{c\Delta}$ сцепленные с контуром m . Поток Φ_s выражается через функцию потока φ_s для этой индукции:

$$\varphi_s = \frac{\Psi_{sm}}{\pi} \ln(t/a_1), \quad (23)$$

тогда

$$\Phi_s = \mu_0 (\varphi_{s\Pi} - \varphi_{s\Lambda}) = \frac{\mu_0 \Psi_{sm}}{\pi} \ln(t_{\Pi}/t_{\Lambda}), \quad (24)$$

где

$$t_{\Pi} = f(ABS(X_{\Pi})); \quad (25)$$

$$t_{\Lambda} = f(ABS(X_{\Lambda})). \quad (26)$$

Аналогично для потока Φ'_s от индукции B'_s :

$$\varphi'_s = -\frac{\Psi_{sm}}{\pi} \ln(t'/a_1); \quad (27)$$

$$\Phi'_s = \mu_0 (\varphi'_{s\Pi} - \varphi'_{s\Lambda}) = \frac{\mu_0 \Psi_{sm}}{\pi} \ln(t'_{\Pi}/t'_{\Lambda}), \quad (28)$$

где

$$t'_{\Pi} = f(ABS(X'_{\Pi})); \quad (29)$$

$$t'_{\Lambda} = f(ABS(X'_{\Lambda})). \quad (30)$$

Для потока $\Phi_{c\Delta}$ от индукции $B_{c\Delta}$:

$$\varphi_{c\Delta} = Q \int_0^X (H_{c \max} - H_c) dx = Q [\Psi_{sm} (ABS(X))/\delta' - \Psi_{sm} \ln(V + R\sqrt{V^2 - 1})], \quad (31)$$

где

$$V = (2t/a_1 - 1); \quad (32)$$

$$R = -1, \text{ если } V < 0; Q = 1, \text{ если } X < 0;$$

$$R = 1, \text{ если } V \geq 0; Q = -1, \text{ если } X \geq 0;$$

$$\begin{aligned} \Phi_{c\Delta} &= \mu_0 (\varphi_{c\Delta\Pi} - \varphi_{c\Delta\Lambda}) = \mu_0 \Psi_{sm} Q_{\Pi} [ABS(X_{\Pi}) - \\ & - \delta' \ln(V_{\Pi} + R_{\Pi} \sqrt{V_{\Pi}^2 - 1})/\pi]/\delta' - \mu_0 \Psi_{sm} Q_{\Lambda} [ABS(X_{\Lambda}) - \\ & - \delta' \ln(V_{\Lambda} + R_{\Lambda} \sqrt{V_{\Lambda}^2 - 1})/\pi]/\delta', \end{aligned} \quad (33)$$

где

$$V_{\Pi} = (2t_{\Pi}/a_1 - 1); \quad (34)$$

$$V_{\Lambda} = (2t_{\Lambda}/a_1 - 1); \quad (35)$$

$$Q_{\Pi} = -1, \text{ если } V_{\Pi} < 0; Q_{\Pi} = 1, \text{ если } X_{\Pi} < 0;$$

$$Q_{\Lambda} = 1, \text{ если } V_{\Lambda} \geq 0; Q_{\Lambda} = -1, \text{ если } X_{\Lambda} \geq 0.$$

Все сказанное о расчете $\Phi_{c\Delta}$ распространяется и на поток $\Phi'_{c\Delta}$, соответствующий индукции $B'_{c\Delta}$, если заменить X на X' , X_{Λ} на X'_{Λ} , X_{Π} на X'_{Π} .

Для расчета проводимости взаимоиндукции между контурами K и m надо сначала определить поток Φ_{km} , сцепленный с контуром m :

$$\Phi_{km} = \Phi_s + \Phi'_s + \Phi_{c\Delta} + \Phi'_{c\Delta}. \quad (36)$$

Через поток Φ_{km} выражается искомая проводимость взаимоиндукции между контурами K и m при расстоянии между осями b_{km} :

$$\Lambda_{km} = \Phi_{km}/i_k. \quad (37)$$

Варьированием расстояния между осями контуров с необходимым шагом определяется зависимость

$$\Lambda_{km} = f(b_{km}), \quad (38)$$

и после обратного преобразования

$$\alpha_{km} = b_{km}/k \quad (39)$$

получается кривая (1).

В основе анализа переходных процессов электрических машин лежат нелинейные дифференциальные уравнения электрического состояния ветвей и уравнения динамики. В связи с тем, что одна из фаз конденсаторного двигателя со-

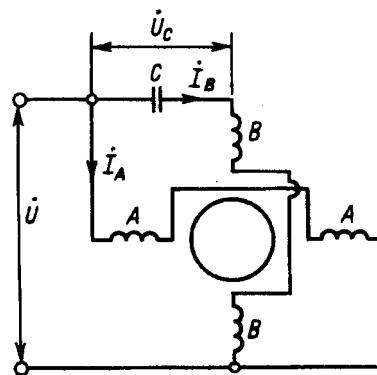


Рис. 5. Схема конденсаторного двигателя

держит емкость C (рис. 5), эти уравнения для АКДЯ в матричной форме в соответствии со вторым законом Кирхгофа могут быть представлены следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \bar{U}_s &= \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + [R_s] \bar{i}_s + \bar{U}_c; \quad 0 = \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + [R_R] \bar{i}_R; \\ \frac{d\bar{U}_c}{dt} &= [1/C] \bar{i}_s; \quad \frac{d\Omega}{dt} = (M_s + M_c)/J; \quad \frac{d\alpha}{dt} = \Omega, \end{aligned} \quad (40)$$

где

$$\bar{U}_s = [U_1; U_1]^T, \quad (41)$$

\bar{U}_s — вектор мгновенных значений напряжений сети, приложенных к ветвям обмотки статора;

$$\bar{U}_c = [0; U_c]^T, \quad (42)$$

\bar{U}_c — вектор мгновенных значений напряжений на конденсаторах в ветвях обмоток статора;

$$\bar{\Psi}_s = [\Psi_{sA}; \Psi_{sB}]^T, \quad (43)$$

$\bar{\Psi}_s$ — вектор мгновенных значений потокоцеплений ветвей обмотки статора;

$$\bar{\Psi}_R = [\Psi_{R1}, \Psi_{R2}, \dots, \Psi_{RZR}]^T, \quad (44)$$

$\bar{\Psi}_R$ — вектор мгновенных значений потокоцеплений ветвей обмотки ротора;

$$\bar{i}_s = [i_{sA}, i_{sA}]^T, \quad (45)$$

\bar{i}_s — вектор мгновенных значений токов ветвей обмотки статора;

$$\bar{i}_R = [i_{R1}, i_{R2}, \dots, i_{RZR}]^T, \quad (46)$$

\bar{i}_R — вектор мгновенных значений токов ветвей обмотки ротора;

$$[R_s] = \text{diag}(R_{sA}; R_{sB}), \quad (47)$$

$[R_s]$ — матрица активных сопротивлений ветвей обмотки статора;

$$[R_R] = \text{diag}(R_{B1}, R_{B2}, \dots, R_{BZR}), \quad (48)$$

$[R_R]$ — матрица активных сопротивлений ветвей

обмотки ротора;

$$[1/C] = \text{diag}(0; 1/C), \quad (49)$$

$[1/C]$ — матрица обратных емкостей конденсаторов; M_z, M_c — соответственно электромагнитный и внешний моменты, действующие на вращающийся ротор; J — момент инерции вращающихся частей; α — угол поворота ротора относительно статора.

Система нелинейных дифференциальных уравнений (40) исчерпывающим образом описывает переходные процессы в любом конденсаторном двигателе, однако ее решение невозможно без установления уравнений связи между токами ветвей \bar{i}_s и \bar{i}_R и их потокосцеплениями $\bar{\Psi}_s$ и $\bar{\Psi}_R$. При этом в насыщенных АКДЯ связь между токами ветвей и их потокосцеплениями приходится устанавливать в процессе численного интегрирования (40) на основе анализа магнитного поля в активной зоне машины. Для сокращения вычислительных затрат по времени интегрирование (40) лучше проводить непосредственно относительно потокосцеплений $\bar{\Psi}_s$ и $\bar{\Psi}_R$, определяя на каждом шаге интегрирования токи индуктивно связанных ветвей \bar{i}_s и \bar{i}_R по их потокосцеплениям через расчет электромагнитного поля в активной зоне АКДЯ.

Проводники с токами заменяются поверхностями с магнитными оболочками. Каждый виток с током образует магнитную оболочку, которая опирается на этот виток. Плотность двойного слоя магнитных зарядов оболочки постоянна и определяется токами контура, причем форма магнитной оболочки не влияет на результат расчета поля. При наложении магнитных оболочек на схему замещения магнитной цепи АКДЯ (рис. 2) в ветвях, которые пересекут магнитные оболочки, появляются источники МДС; МДС ветви равна алгебраической сумме магнитных потенциалов всех оболочек, пересекающих эту ветвь.

В короткозамкнутой обмотке АКДЯ реальные токи стержней и участков колец выражаются через контурные токи, ток каждого контура заменяется оболочкой, которая опирается на этот контур. МДС ветвей схемы замещения (рис. 2) обусловлены токами обмотки статора и токами короткозамкнутой обмотки ротора.

Если схему замещения магнитной цепи АКДЯ представить из обобщенных ветвей, образованных последовательным соединением нелинейного элемента и источника МДС, а магнитные напряжения, потоки и МДС всех ветвей схемы замещения свести в соответствующие векторы \bar{U} , $\bar{\Phi}$, \bar{F} , то при кусочно-линейной аппроксимации характеристик нелинейных элементов эти величины будут связаны соотношением

$$\bar{\Phi} = [\Lambda] \bar{U} + [\Lambda] \bar{F} + \bar{J}, \quad (50)$$

где элементы матрицы $[\Lambda]$ и вектора \bar{J} являются коэффициентами аппроксимации вебер-амперных характеристик нелинейных проводимостей.

Значения вектора МДС \bar{F} могут быть выражены через токи ветвей электрической цепи АКДЯ посредством сингулярной матрицы преобразования $[C]$:

$$\bar{F} = [C] \bar{i}_B, \quad (51)$$

где \bar{i}_B — вектор токов ветвей электрической цепи АКДЯ;

$$\bar{i}_B = \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{i}_R \end{bmatrix}. \quad (52)$$

Потокасцепления электрических ветвей $\bar{\Psi}_B$ определяются через потоки ветвей схемы замещения магнитной цепи:

$$\bar{\Psi}_B = \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_s \\ \bar{\Psi}_R \end{bmatrix} = [C]^T \bar{\Phi} + [L_\Lambda] \bar{i}_B, \quad (53)$$

где элементами матрицы $[L_\Lambda]$ являются индуктивности любого рассеяния обмоток.

Подставив (50) в (53), с учетом (51) получаем:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_s \\ \bar{\Psi}_R \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{i}_R \end{bmatrix} + [C]^T [\Lambda] \bar{U} + [C]^T \bar{J}, \quad (54)$$

где

$$[L] = [C]^T [\Lambda] [C] + [L_\Lambda]. \quad (55)$$

Выражение (54) представляет собой нелинейное уравнение связи неизвестных токов ветвей электрической цепи АКДЯ с их потокосцеплениями. Матрица $[L]$ является симметричной положительно определенной и имеет обратную:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{i}_R \end{bmatrix} = [L]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_s \\ \bar{\Psi}_R \end{bmatrix} - [C]^T [\Lambda] \bar{U} - [C]^T \bar{J}. \quad (56)$$

Выражение (56) позволяет определить токи ветвей электрической цепи по их потокосцеплениям, известным на каждом шаге численного интегрирования (40), через расчет схемы замещения магнитной цепи АКДЯ по алгоритмам, приведенным в [4].

Таким образом, определение токов индуктивно связанных ветвей АКДЯ по их потокосцеплениям позволяет непосредственно интегрировать уравнения состояния (40) численными методами и получать кривые изменения во времени электрических и механических величин: потокосцеплений ветвей, магнитных потоков в различных частях магнитопровода, ЭДС, токов ветвей, угловой частоты вращения и электромагнитного

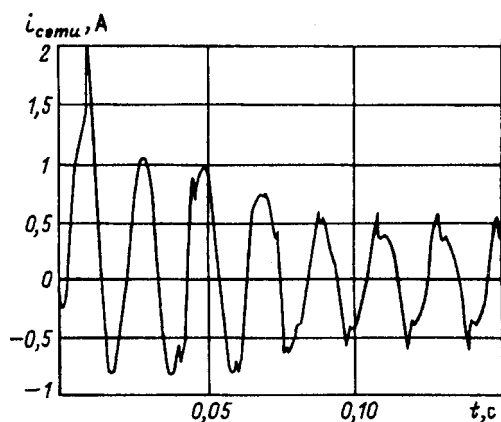


Рис. 6. Кривая мгновенных значений полного тока сети при пуске

момента, при этом электромагнитный момент определяется по формуле [1, 4]:

$$M_g = 0,5 [U_s]^T (\partial [\Lambda(\alpha)] / \partial \alpha) [U_s]. \quad (57)$$

Предложенная математическая модель была реализована на основе универсальных рабочих алгоритмов анализа переходных электромагнитных процессов электрических машин произвольного исполнения [4].

При переходных процессах в обмотках электрических машин появляются токи, превосходящие номинальные. Электромагнитный момент и электромагнитные силы также больше, чем в номинальном режиме. В некоторых случаях могут появляться недопустимо большие электрические напряжения на отдельных элементах электрической машины, например на конденсаторе. Поэтому анализ переходных процессов — одна из наиболее важных частей электромагнитного расчета двигателей.

С помощью предложенной математической модели был проведен электромагнитный расчет пуска и установившегося режима при холостом ходе и при номинальной нагрузке двигателя ДКВ-10-2-У4 ($P_n = 10$ Вт, $2p = 2$, $C = 2$ мкФ, $U_c = 220$ В, $f = 50$ Гц):

D_R , мм	D_s , мм	1δ , мм	W_{sA} , мм	W_{sB} , мм
29,7	30	40	1050	950

Кривая мгновенных значений полного тока сети $i_{\text{сети}}$ при пуске на холостом ходу показана на рис. 6.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных (на рис. 7 приведены кривые мгновенных значений тока $i_{\text{сети}}$ в установившемся режиме при холостом ходе) демонстрирует высокую степень точности полученных результатов.

Математическая модель АКДЯ на основе МЗК с использованием расчета схемы замещения

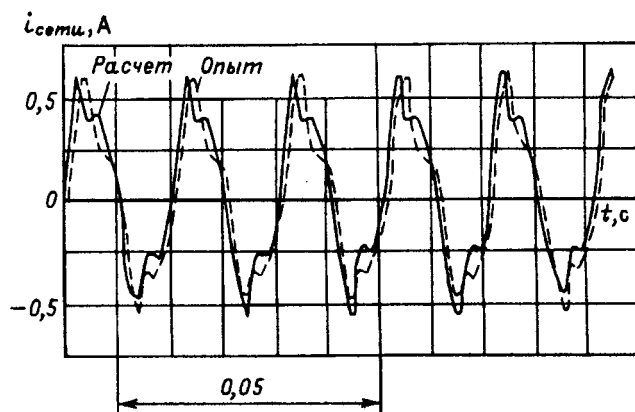


Рис. 7. Кривые мгновенных значений полного тока сети, в установившемся режиме

электромагнитного поля насыщенной электрической машины по заданным потокоцеплениям ее электрических ветвей позволяет быстро и с высокой степенью точности делать проектные расчеты асинхронных явнополюсных конденсаторных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Власов А.И. и др. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Кузнецов В.А. Моделирование магнитных полей и процессов в электромеханических преобразователях. — Труды МЭИ, 1994, № 11.
3. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А., Лабутин А.А. Математическое моделирование технологического явнополюсного конденсаторного двигателя. — Электротехника, 1995, № 11.
4. Мартынов В.А. Анализ динамических режимов индуктивных электромеханических устройств. — Электричество, 1995, № 3.
5. Аванесов М.А. Аналитический расчет взаимных проводимостей зубцовых контуров электрической машины при особых граничных условиях. Сб. науч. трудов: Автоматизация исследований и проектирования электрических машин и трансформаторов, Иваново, 1987.

[03.06.98]

А в т о р ы: Мартынов Владимир Александрович окончил в 1977 г. электромеханический факультет Ивановского энергетического института. В 1997 г. защитил в МЭИ докторскую диссертацию на тему «Математическое моделирование переходных процессов электрических машин на основе численного метода расчета электромагнитного поля». Профессор кафедры «Электрические станции и диагностика электрооборудования» Ивановского государственного энергетического университета.

Лабутин Анатолий Анатольевич окончил электромеханический факультет МЭИ в 1995 г. Аспирант МЭИ.

Синтез взаимосвязанных систем электропривода на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики

ЛИХОМАНОВ А.М., ДМИТРИЕВ Б.Ф., ПАНИН С.Ю., ПИСАРЕВ А.Ю.

Рассматривается метод синтеза взаимосвязанных систем электропривода на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики. Приводятся примеры синтеза.

Ключевые слова: электропривод, обратные задачи динамики, вектор-функция выходных координат

Стремление наиболее полно использовать ресурсы современного технологического оборудования диктует необходимость использования взаимосвязанного управления, что приводит к необходимости рассмотрения в задачах анализа и синтеза дифференциальных уравнений высокой размерности [1, 2]. Наиболее просто задачи синтеза таких систем могут быть решены на основе использования методов обратных задач динамики [3, 4]. Однако применение известных подходов затруднительно из-за необходимости использования сложных оптимизационных процедур поиска минимума функционала, характеризующего степень приближения реальной вектор-функции выходных координат к желаемой [3, 4].

В статье для задач синтеза взаимосвязанных систем рассматривается частотный подход к решению обратных задач динамики, основанный на искусственной периодизации желаемой вектор-функции выходных координат [5–16].

Теоретическое обоснование вопроса. Пусть взаимосвязанная система описывается следующим дифференциально-матричным уравнением:

$$[A(p)][Y(t)] = [R(p)][V(p)]. \quad (1)$$

Здесь $[A(p)]$ — квадратная матрица операторных коэффициентов размером $n \times n$:

$$[A(p)] = \begin{bmatrix} a_{11}(p) & a_{12}(p) & \dots & a_{1n}(p) \\ a_{21}(p) & a_{22}(p) & \dots & a_{2n}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}(p) & a_{n2}(p) & \dots & a_{nn}(p) \end{bmatrix};$$

$[R(p)]$ — прямоугольная матрица операторных коэффициентов $n \times m$:

$$[R(p)] = \begin{bmatrix} r_{11}(p) & r_{12}(p) & \dots & r_{1m}(p) \\ r_{21}(p) & r_{22}(p) & \dots & r_{2m}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1}(p) & r_{n2}(p) & \dots & r_{nm}(p) \end{bmatrix};$$

$[Y(t)]^T = [Y_1(t) \dots Y_n(t)]$ — однострочная n -мерная матрица выходных координат; $[V(t)]^T = [V_1(t) \dots V_m(t)]$ — однострочная m -мерная матрица входных воздействий.

The paper considers a synthesis of electric drive interconnected systems on the basis of a frequency approach to the solution of inverse dynamics problems. Examples of the synthesis are given.

Key words: electric drive, inverse dynamic problems, vector-function of output co-ordinate

Изображение по Лапласу вектор-функции будет

$$[Y(s)] = [A(s)]^{-1} [R(s)][V(s)] = \frac{[A^*(s)]}{|A(s)|} \times [R(s)][V(s)] = \frac{[T(s)]}{|A(s)|} V(s),$$

где $[A^*(s)]$ — матрица, присоединенная к $[A(s)]$.

Изображение по Лапласу координаты

$$Y_i(s) = \sum_{j=1}^m \frac{t_{ij}(s) V_j(s)}{|A(s)|}.$$

Теперь, если j -е входное воздействие $V_j(t)$ на отрезке времени $(0-T)$ аппроксимировано в виде тригонометрического ряда Фурье

$$V_j(t) = P_{j0} + \sum_{k=1}^{\infty} P_{jk} \cos k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} T_{jk} \sin k\omega t; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (2)$$

то сумма совокупностей частных решений от отдельных составляющих рядов (2) есть i -я выходная координата $Y_i(t)$ с точностью до $\Delta_i(t)$ [6–16]. Для этой цели в уравнение (1) подставим $U_j(s)$ в виде

$$V_j = \frac{P_{j0}}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{P_{jk}s}{s^2 + k^2\omega^2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{T_{jk}k\omega}{s^2 + k^2\omega^2}.$$

Оригинал i -й выходной координаты в соответствии с теоремой разложения:

$$Y_i(t) = \sum_{j=1}^m \left\{ \begin{aligned} & \frac{t_{ij}(s=0)}{|A(s=0)|} P_{j0} + \sum_{k=1}^{\infty} |W_{ij}(j\omega k)| P_{jk} \cos [k\omega t + \\ & + \varphi_{ij}(\omega k)] + \sum_{k=1}^{\infty} |W_{ij}(j\omega k)| T_{jk} \sin (k\omega t + \\ & + \varphi_{ij}(\omega k)) + \Delta_{ij}(t) \end{aligned} \right\} =$$

$$= A_{i0} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{ik} \cos (k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} B_{ik} \sin (k\omega t) + \Delta_i(t);$$

$$\left. \begin{aligned} |W_{ij}(j\omega k)| &= \sqrt{W_{ij}^2(\omega k) + V_{ij}^2(\omega k)}; \\ \varphi_{ij}(\omega k) &= \arctg \left[\frac{V_{ij}(\omega k)}{W_{ij}(\omega k)} \right]; \quad W_{ij}(\omega k) = \operatorname{Re} \left[\frac{t_{ij}(j\omega k)}{|A(j\omega k)|} \right]; \\ V_{ij}(\omega k) &= \operatorname{Im} \left[\frac{t_{ij}(j\omega k)}{|A(j\omega k)|} \right]; \quad \Delta_{ij}(t) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{t_{ij}(s)}{|A'(s_i)|} \right] e^{s_i t} \times \\ & \times \left[\frac{P_{j0}}{s_i} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{T_{jk}k\omega}{s_i^2 + k^2\omega^2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{P_{jk}s_i}{s_i^2 + k^2\omega^2} \right], \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где N — порядок характеристического полинома $|A(s)|$; s_i — i -й корень характеристического полинома $|A(s)|$; $|A'(s)|$ — производная $|A(s)|$ по s при $s=s_i$; s — оператор Лапласа.

Из выражения для $\Delta_{ij}(t)$ следует:

для устойчивого дифференциального уравнения (1) значения $\Delta_{ij}(t)$ влияют только на начальном участке траектории;

максимальное значение $\Delta_i(t)$ определяется из условия

$$\Delta_i(0) = A_{i0} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{ik};$$

для минимизации $\Delta_{ij}(t)$ необходимо выполнить условие

$$P_{jk} < 0; \quad T_{jk} > 0.$$

В случае пренебрежения $\Delta_{ij}(t)$ задача нахождения $Y_i(t)$ сводится к определению A_{ik} и B_{ik} . Для этой цели в уравнение (1) подставим $V_j(t)$ и $Y_i(t)$ в виде (2), (3). Для i -й строки в случае неучета $\Delta_i(t)$ можно записать:

$$\sum_{j=1}^n F1_{ij} A_{jk} - \sum_{j=1}^n F2_{ij} B_{jk} = \sum_{j=1}^m E1_{ij} P_{jk} - \sum_{j=1}^m E2_{ij} T_{jk};$$

$$\sum_{j=1}^n F2_{ij} A_{jk} - \sum_{j=1}^n F1_{ij} B_{jk} = \sum_{j=1}^m E2_{ij} P_{jk} - \sum_{j=1}^m E2_{ij} T_{jk};$$

$$F1_{ij} = \sum_{r=0}^{[n_{ij}/2]} (-1)^r (k\omega)^{2r} a_{n_{ij}-2r};$$

$$F2_{ij} = \sum_{r=0}^{[(n_{ij}-1)/2]} (-1)^{r+1} (k\omega)^{2r+1} a_{n_{ij}-2r-1},$$

где n_{ij} — порядок полинома $a_{ij}(p)$ матрицы $A(p)$; m_{ij} — порядок полинома $b_{ij}(p)$ матрицы $B(p)$; $[\]$ — целая часть.

Следовательно для нахождения A_{ik} и B_{ik} необходимо решить систему алгебраических уравнений порядка $(2n \times 2n)$:

$$\left\{ \begin{aligned} \begin{bmatrix} G & \dots & T \\ \dots & \dots & \dots \\ -T & \dots & G \end{bmatrix} Z &= \begin{bmatrix} C & \dots & L \\ \dots & \dots & \dots \\ -L & \dots & C \end{bmatrix} Z_1; \\ Z^T &= [A_{1k} A_{2k} \dots A_{nk} B_{1k} B_{2k} \dots B_{nk}]; \\ Z_1^T &= [P_{1k} P_{2k} \dots P_{mk} T_{1k} T_{2k} \dots T_{mk}], \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

а элементы q_{ij} , t_{ij} , c_{ij} , l_{ij} матриц G , T , C , L вычисляются по формулам:

$$q_{ij} = F1_{ij}; \quad t_{ij} = F2_{ij}; \quad c_{ij} = E1_{ij}; \quad l_{ij} = E2_{ij}.$$

Постоянные составляющие A_{i0} в (3) находятся

при решении системы алгебраических уравнений порядка $(n \times n)$:

$$SZ_2 = DZ_3; \quad (5)$$

$$Z_2^T = [A_{10} A_{20} \dots A_{n0}]; \quad Z_3^T = [P_{10} P_{20} \dots P_{m0}],$$

а элементы матриц S и D вычисляются по формулам:

$$s_{ij} = a_{ij}(p=0); \quad d_{ij} = r_{ij}(p=0).$$

Значение ω выбирается из условия

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \geq T_1,$$

где T_1 — отрезок времени, на котором ищется решение.

Пример. Пусть матрицы уравнения (1) имеют вид:

$$A(p) = \begin{bmatrix} p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 & k_{21} a_3 p + k_{21} a_4 \\ k_{21} t_3 p + k_{21} t_4 & p^4 + t_1 p^3 + t_2 p^2 + t_3 p + t_4 \end{bmatrix};$$

$$R(p) = \begin{bmatrix} a_3 p + a_4 & 0 \\ 0 & t_3 p + t_4 \end{bmatrix}; \quad a_1 = 5,29; \quad a_2 = 17,68;$$

$$a_3 = 22,83; \quad a_4 = 0,5258; \quad t_1 = 52,9; \quad t_2 = 1768,0;$$

$$t_3 = 22830,0; \quad t_4 = 5256,0; \quad k_{12} = k_{21} = 0,5.$$

Решение будем искать на отрезке времени 0—6 с, что определяет значение $\omega \approx 0,5 \text{ с}^{-1}$. Вектор входных воздействий

$$V^T(t) = [V_1(t) \ V_2(t)] = [I(t) \ I(t)].$$

Входное воздействие $V_i(t)$ искусственно периодизируется (рис. 1) и соответствующее периодическое движение аппроксимируется тригонометрическим рядом Фурье:

$$V_i = Z_i(t) = D_{i0} + \sum_{k=1}^{\infty} D_{ik} \sin(k\omega t); \quad D_{i0} = 0,5;$$

$$D_{ik} = \frac{2}{\pi k}; \quad k = 2c+1; \quad c = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Элементы матриц G , T , C , L системы алгебраических уравнений (4) примут вид:

$$g_{11} = k^4 \omega^4 - a_2 k^2 \omega^2 + a_4; \quad g_{12} = k_{21} a_4;$$

$$g_{21} = k_{12} t_4; \quad g_{22} = k^4 \omega^4 - t_2 k^2 \omega^2 + t_4;$$

$$t_{11} = -a_1 k^3 \omega^3 + a_3 k \omega; \quad t_{12} = k_{21} a_3 k \omega;$$

$$t_{21} = k_{12} t_3 k \omega; \quad t_{22} = -t_1 k^3 \omega^3 + t_3 k \omega;$$

$$l_{11} = a_3 k \omega; \quad l_{22} = t_3 k \omega; \quad c_{11} = a_4;$$

$$c_{22} = t_4; \quad c_{12} = c_{21} = l_{12} = l_{21} = 0.$$

Элементы матриц S , D системы алгебраи-

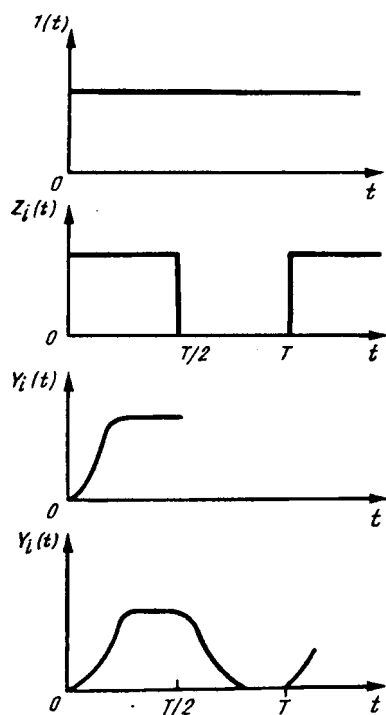


Рис. 1

ческих уравнений (5) примут вид:

$$s_{11} = a_4; \quad s_{12} = k_{21} a_4; \quad s_{21} = k_{21} t_4;$$

$$s_{22} = t_4; \quad d_{11} = a_4; \quad d_{12} = 0, 0; \quad d_{21} = 0, 0; \quad d_{22} = t_4.$$

На рис. 2 представлены графики $Y_1(t)$, $Y_2(t)$ рассчитанные с точностью до 50-го частного решения, которые практически совпадают с результатом расчета методом Рунге—Кутты с погрешностью до 1%. Теперь перейдем к рассмотрению практических задач синтеза, по отношению к которым решается обратная задача, т.е. по известным $Y_i(t)$ и $V_i(t)$ определяются необходимые параметры системы.

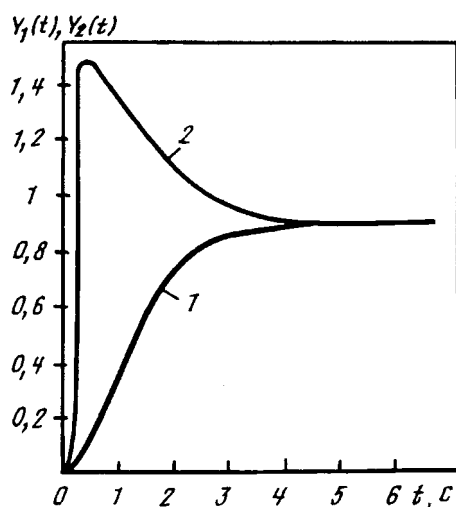


Рис. 2

Синтез программных управлений. Задача ставится следующим образом. Пусть задано уравнение движения системы при нулевых начальных условиях в виде (1). Необходимо синтезировать вектор $[V(t)]$ из условия перевода системы из состояния $Y_i(t)=0$ в $Y_i(t_k)=Y_{ik}$ в соответствии с функционалом

$$J = \int_0^{t_k} [Y_i^*(t) - Y_i(t)]^2 dt \leq \delta, \quad (7)$$

где Y_{ik} — конечное значение i -го выхода системы; $Y_i^*(t)$ — желаемая траектория движения; δ — допустимое значение погрешности.

Для этой цели $Y_i^*(t)$ искусственно периодизируется в соответствии с правилом (рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} Y_i(t) &= Y_i^*(t) && \text{при } 0 \leq t \leq \frac{T}{2}; \\ Y_i(t) &= Y_i^*\left(\frac{T}{2}\right) - Y_i^*\left(t - \frac{T}{2}\right) && \text{при } \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

и соответствующее периодическое движение аппроксимируется тригонометрическим рядом Фурье:

$$Y_i(t) = A_{0i} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{ik} \cos(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} B_{ik} \sin(k\omega t);$$

$$A_{i0} = \frac{Y_i^*\left(\frac{T}{2}\right)}{2}; \quad (9)$$

$$\omega = 2\pi/T; \quad k = 2c+1; \quad c = 0, 1, 2, \dots$$

Для нахождения вектора $[V(t)]$, реализующего заданный выход системы $[Y^*(t)]$, необходимо найти P_{i0} , P_{ik} , T_{ik} в (2). Очевидно, что задача сводится к решению системы алгебраических уравнений (4) относительно вектора Z_1 , для решения которой необходимо, чтобы число управляющих воздействий $V_i(t)$ равнялось числу управляемых координат $Y_i(t)$. Таким образом, решая систему (4), можно построить многообразие законов управления $[V(t)]$. При этом в качестве условий доопределения выступает точность реализации функционала (7), т.е. число гармоник, участвующих в синтезе, а в качестве условия решаемости задачи — условие $|V_i(t)| < V_0$, где V_0 — допустимое значение управления.

Пример. В качестве примера рассмотрим взаимосвязанную систему стабилизации скорости (рис. 3). Пусть

$$W_1(s) = \frac{a_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s} = W_2(s) = \frac{t_3}{s^3 + t_1 s^2 + t_2 s};$$

$$a_1 = t_1 = 5,023; \quad a_2 = t_2 = 15,2;$$

$$a_3 = t_3 = 17,92; \quad k_{12} = k_{21} = 0,5.$$

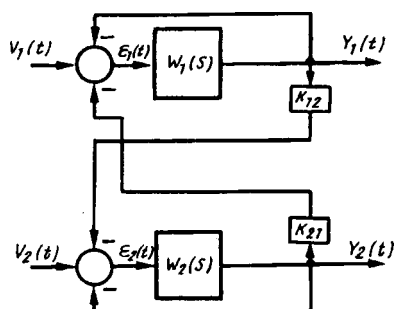


Рис. 3

Матрицы уравнения (1) примут вид:

$$A(p) = \begin{bmatrix} p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 & k_{21} a_3 \\ k_{21} t_3 & p^3 + t_1 p^2 + t_2 p + t_3 \end{bmatrix}; \quad R(p) = \begin{bmatrix} a_3 & 0 \\ 0 & a_3 \end{bmatrix}.$$

В качестве желаемой $Y_i^*(t)$ примем траекторию с ограничением ускорения и скорости нарастания ускорения (рис. 4, 1, 2). Гармоники тригонометрического ряда (9) в соответствии с формулами Эйлера:

$$\left. \begin{aligned} A_k &= \frac{V_m m^2 (1-l)}{2l(\pi k)^3} \left[-\sin \frac{2\pi k l}{m(1-l)} - \sin \frac{2\pi k}{m} + \sin \frac{2\pi k}{m(1-l)} \right]; \\ B_k &= \frac{V_m m^2 (1-l)}{2l(\pi k)^3} \left[-1 + \cos \frac{2\pi k l}{m(1-l)} + \cos \frac{2\pi k}{m} - \cos \frac{2\pi k}{m(1-l)} \right]; \\ A_0 &= \frac{V_m}{2}; \quad m \geq \frac{2}{1-l}; \quad t_y = \frac{T}{m(1-l)}; \quad t_1 = \frac{lT}{m(1-l)}; \\ t_2 &= \frac{T}{m}; \quad a_m = \frac{V_m}{t_y(1-l)}, \end{aligned} \right\} (10)$$

где t_y — время управления; v_m , a_m — максимальные значения скорости и ускорения i -й выходной координаты.

Пусть $v_m = 1$ рад/с, $l = 0,25$, $m = 3$, что соответствует $a_m = 0,995$ рад/с²; $t_y = 1,4$ с; $t_1 = 0,35$ с; $t_2 = 1,04$ с. Система алгебраических уравнений (4) примет вид:

$$\begin{aligned} &(-a_1 k^2 \omega^2 + a_3) A_{1k} + k_{21} a_3 A_{2k} + \\ &+ (-k^3 \omega^3 + a_2 k \omega) B_{1k} = a_3 P_{1k}; \\ &k_{12} t_3 A_{1k} + (-t_1 k^2 \omega^2 + t_3) A_{2k} + \\ &+ (-k^3 \omega^3 + t_2 k \omega) B_{2k} = t_3 P_{2k}; \\ &(k^3 \omega^3 - a_2 k \omega) A_{1k} + (-a_1 k^2 \omega^2 + a_3) B_{1k} + \\ &+ k_{21} a_3 B_{2k} = a_3 T_{1k}; \\ &(k^3 \omega^3 - t_2 k \omega) A_{2k} + k_{12} t_3 B_{1k} + \\ &+ (-t_1 k^2 \omega^2 + t_3) B_{2k} = t_3 T_{2k}. \end{aligned}$$

Система алгебраических уравнений (5) примет вид:

$$a_3 A_{10} + k_{21} a_3 A_{20} = a_3 P_{10};$$

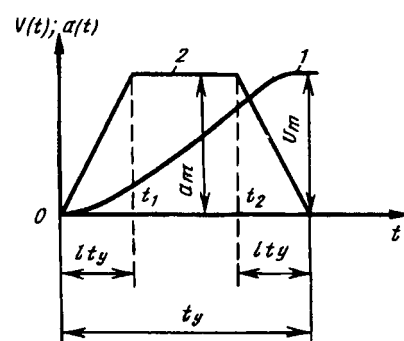


Рис. 4

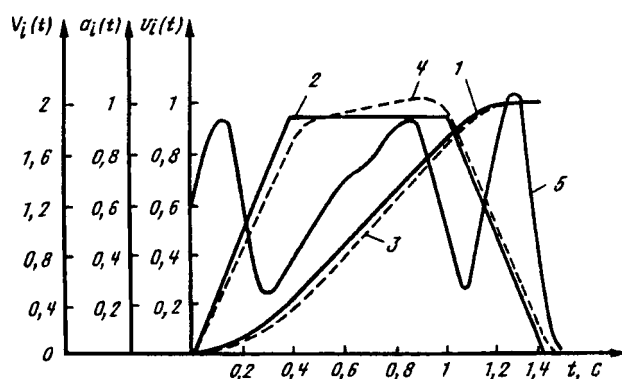


Рис. 5

$$k_{12} t_3 A_{10} + t_3 A_{20} = t_3 P_{20}.$$

На рис. 5 представлены графики скорости и ускорения координаты $Y_i^*(t)$, рассчитанные в соответствии с (10) с точностью до 50-й гармоники (кривые 1, 2); скорости и ускорения выходной координаты $Y_i(t)$ при подаче управляющего воздействия $V_i(t)$ (2) с точностью до 7-й гармоники (кривые 3, 4); график управляющего воздействия $V_i(t)$ (2), рассчитанный с точностью до 7-й гармоники (кривая 5).

Синтез взаимосвязанной системы позиционирования. Рассмотрим взаимосвязанную систему позиционирования, выполненную по структурной схеме рис. 3, в которой

$$W_1(s) = \frac{\sum_{i=1}^m b_i s^{m-i}}{\sum_{i=1}^m a_i s^{m-i}}; \quad W_2(s) = \frac{\sum_{i=1}^m l_i s^{m-i}}{\sum_{i=1}^m t_i s^{m-i}}; \quad n \geq m-1.$$

Необходимо определить a_i , b_i , l_i , t_i из условия (7) при заданных k_{12} , k_{21} на вектор задающих воздействий $V^T(t) = [V_1(t) \ V_2(t)] = [I(t), \ I(t)]$. Входное задающее воздействие $V_i(t)$ и желаемый выход системы $Y_i^*(t)$ искусственно периодизируются в соответствии с (8) и соответствующие периодические движения аппроксимируются тригонометрическими рядами Фурье (6), (9). Вектор ошибок $\varepsilon(t) = [\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)]$ представляется в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_i(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} (D_{ik} - B_{ik}) \sin(k\omega t) - \sum_{k=1}^{\infty} A_{ik} \cos(k\omega t) - \\ &- k_{ji} A_{jk} \cos(k\omega t) - k_{ji} B_{jk} \sin(k\omega t) + D_{i0} - A_{i0} - k_{ji} A_{j0} = \\ &= \varepsilon_{i0} + \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon A_{ik} \cos(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon B_{ik} \sin(k\omega t). \quad (11) \end{aligned}$$

Теперь для определения коэффициентов $W_i(p)$ необходимо решить систему алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{A_{ik}^2 + B_{ik}^2} &= \sqrt{\varepsilon A_{ik}^2 + \varepsilon B_{ik}^2} |W_i(j\omega k)|; \\ \arctg \left[\frac{A_{ik}}{B_{ik}} \right] - \arctg \left[\frac{\varepsilon A_{ik}}{\varepsilon B_{ik}} \right] &= \arctg \left[\frac{\operatorname{Im} W_i(j\omega k)}{\operatorname{Re} W_i(j\omega k)} \right], \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

порядок которой определяется числом оптимизируемых коэффициентов, а условием решаемости задачи, т.е. реализуемости заданных траекторий $Y_i^*(t)$ в соответствии с (7), является условие устойчивости синтезированной системы.

Пример. В качестве $Y_i^*(t)$ рассмотрим траекторию с треугольным изменением скорости (рис. 6). На рис. 6: 1 — желаемая траектория $Y_i^*(t)$; 2 — скорость изменения $\dot{Y}_i^*(t)$; 3 — ускорение $\ddot{Y}_i^*(t)$.

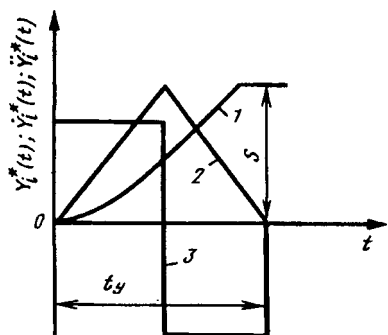


Рис. 6

Гармоники тригонометрического ряда (9) рассчитываются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_{ik} &= \frac{2m_i^2 s_i}{(\pi k)^3} \left[-2 \sin \frac{\pi k}{m_i} + \sin \frac{2\pi k}{m_i} \right]; \quad A_{0k} = \frac{s_i}{2}; \\ B_{ik} &= \frac{2m_i^2 s_i}{(\pi k)^3} \left[-1 + 2 \cos \frac{\pi k}{m_i} - \cos \frac{2\pi k}{m_i} \right]; \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{m_i t_{iy}}; \quad k=2l+1; \quad l=0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где t_{iy} — время управления по i -й выходной координате; s_i — перемещение по i -й выходной координате.

Пусть:

$$W_1(s) = \frac{a_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s}; \quad W_2(s) = \frac{t_3}{s^3 + t_1 s^2 + t_2 s};$$

$$k_{12}=0,4; \quad k_{21}=0,8; \quad m_1=3; \quad m_2=5; \quad \omega=1 \text{ с}^{-1},$$

что соответствует $t_1=21 \text{ с}$, $t_2=1,26 \text{ с}$; $s_1 = \frac{1-k_{21}}{1-k_{21}k_{12}}=0,298 \text{ рад}$; $s_2 = \frac{1-k_{12}}{1-k_{21}k_{12}}=0,884 \text{ рад}$.

Подставляя в уравнения

$$(p^3 + a_1 p^2 + a_2 p) Y_1(t) = a_3 \varepsilon_1(t);$$

$$(p^3 + t_1 p^2 + t_2 p) Y_2(t) = t_3 \varepsilon_2(t)$$

$Y_i(t)$, $\varepsilon_i(t)$ в виде (9), (11) и сравнивая полиномы при одинаковых функциях времени, получим для нахождения a_i , t_i системы алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} -\omega^2 A_{11} & \omega B_{11} & -EA_{11} \\ -\omega^2 B_{11} & -\omega A_{11} & -EB_{11} \\ -9\omega^2 A_{13} & 3\omega^2 B_{13} & -EA_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \omega^3 B_{11} \\ -\omega^3 A_{11} \\ 27\omega^3 B_{13} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} -\omega^2 A_{21} & \omega B_{21} & -EA_{21} \\ -\omega^2 B_{21} & -\omega A_{21} & -EB_{21} \\ -9\omega^2 A_{23} & 3\omega^2 B_{23} & -EA_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \omega^3 B_{21} \\ -\omega^3 A_{21} \\ 27\omega^3 B_{23} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

решение которых дает:

$$X_1^T = [a_1 \ a_2 \ a_3] = [3,274; 5,915; 2,2416];$$

$$X_2^T = [t_1 \ t_2 \ t_3] = [6,019; 27,65; 36,05].$$

На рис. 7 представлены желаемые траектории $Y_1^*(t)$, $Y_2^*(t)$, рассчитанные в соответствии с (13) с точностью до 50-й гармоники (кривые 1, 2); реальные траектории $Y_1(t)$, $Y_2(t)$ синтезированной системы (кривые 3, 4).

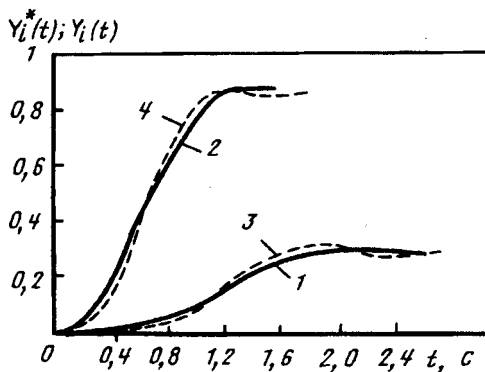


Рис. 7

Синтез взаимосвязанных систем в пространстве состояний. Задачу ставим следующим образом. Пусть дано уравнение движения управляемого объекта i -й сепаратной системы:

$$X_i(t) = A_i X_i(t) + B_i V_i(t); \quad Y_i(t) = Q_i^T X_i(t);$$

$$X_i(0) = [X_{i0,j}], \quad j=1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

Здесь $X_i(t)$ — n -мерный вектор координат состояния; $V_i(t)$ — управляющая функция i -й сепаратной системы; $Y_i(t)$ — скалярная выходная переменная i -й сепаратной системы. Параметры

математической модели постоянны и заданы:

$$Q_i^T = [q_{i1} \ q_{i2} \ \dots \ q_{in}]; \quad B_i^T = [b_{i1} \ b_{i2} \ \dots \ b_{in}];$$

$$A_i = [a_{isj}], \quad s, j = 1, 2, \dots, n.$$

Уравнение измерителя $Z_i(t) = H_i x_i(t)$, где структура матрицы $H_i(r, n)$ задается в зависимости от информационных ограничений, накладываемых на ресурсы i -й сепаратной системы. Закон управления $V_i(t)$ принимаем в виде

$$V_i(t) = C_i^T H_i x_i(t) + n_i \varepsilon_i(t) + m_1 \int \varepsilon_i(t) dt + \\ + \sum_{s=1}^{m_1} k_{si} \varepsilon_s(t) + \sum_{l=1}^{m_2} Y_l(t) k_{li} + \sum_{j=1}^{m_3} C_{ji}^T H_j x_j(t); \quad (15) \\ \varepsilon_i(t) = X_{i3}(t) - Y_i(t).$$

Здесь $X_{i3}(t)$ — задающее воздействие i -й сепаратной системы вида $X_{i3}(t) = I(t)$; $X_j(t)$ — n -мерный вектор координат состояния управляемого объекта j -й сепаратной системы, участвующий в формировании $V_i(t)$; $\varepsilon_s(t)$ — сигнал ошибки s -й сепаратной системы; $Y_i(t)$ — выходная координата 1-й сепаратной системы; H_j — матрица измерителя координат состояния управляемого объекта j -й сепаратной системы, участвующих в формировании $V_i(t)$; m_1, m_2, m_3 — число $\varepsilon_s(t), Y_i(t), X_i(t)$, участвующих в формировании $V_i(t)$; коэффициенты матрицы C_i, C_{ji} , а также n_i, m_i, k_{si}, k_{li} подлежат определению из условия (7).

Подставляя в (15) $V_i(t), X_{i3}(t), Y_i(t)$ в виде (2), (6), (9), а s -е координаты управляемого объекта i -й сепаратной системы в виде

$$x_{is} = A_{is0} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{isk} \cos(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} B_{isk} \sin(k\omega t), \quad (16)$$

получим для нахождения вектора оптимизируемых коэффициентов систему алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_{ik} &= C_i^T H_i [A_{jsk}] - n A_{ik} - \frac{m(D_{ik} - B_{ik})}{k\omega} - \\ &- \sum_{s=1}^{m_1} k_{si} A_{sk} + \sum_{l=1}^{m_2} A_{lk} k_{li} + \sum_{j=1}^{m_3} C_{ji}^T H_j [A_{jsk}]; \\ T_{ik} &= C_i^T H_i [B_{jsk}] + n(D_{ik} - B_{ik}) - \frac{m A_{ik}}{k\omega} + \sum_{s=1}^{m_1} k_{si} \times \\ &\times (D_{sk} - B_{sk}) + \sum_{l=1}^{m_2} k_{lk} B_{lk} + \sum_{j=1}^{m_3} C_{ji}^T H_j [B_{jsk}], \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

порядок которой определяется числом оптимизируемых коэффициентов.

Таким образом, решая систему (17) при различной структуре корректирующих средств, может быть построено многообразие законов уп-

равления (15), реализующих заданную вектор-функцию выходных координат. При этом в качестве условий доопределения выступает значение функционала (7), т.е. число гармоник, участвующих в синтезе, а в качестве условия реализуемости заданной вектор-функции — условие устойчивости синтезированной системы. Значения $P_{ik}, T_{ik}, A_{isk}, B_{isk}$ i -й сепаратной системы находятся в соответствии со следующей алгоритмической процедурой. Уравнение (14) заменяем эквивалентным дифференциальным уравнением при ненулевых начальных условиях:

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i V_i(t) + x_i(0) p I(t), \quad (18)$$

которое преобразуем к виду

$$-A_{i1} x_{ir} + C_{i1} \dot{x}_{ir}(t) - x(0) p I(t) = \\ = A_{i2} x_{i1} + C_{i2} \dot{x}_{ir}(t) + B_i V_i(t), \quad (19)$$

где r_i — номер любой фазовой координаты i -й сепаратной системы, входящей в выход системы.

Элементы матриц $A_{i1}(n, 1); C_{i1}(n, 1); A_{i2}(n, n-1); x_{i1}(n-1, n); C_{i2}(n, n-1):$

$a_{i1j1} = a_{ijr}$ при $j=1, n; c_{i1j1}=0$ при $j=1, n, j \neq r_i;$

$c_{i1r1} = 1; x_{i1j1} = x_{ij}$ при $j=1, n, j \neq r_i; a_{i2js} = a_{ijs}$ при $j=1, n, s=1, n, s \neq r_i; c_{i2js}=0$ при $j=r_i;$
 $c_{i2js}=0$ при $j < r_i, j \neq s, c_{i2js}=1$ при $j < r_i, j=s,$
 $c_{i2js}=1$ при $j > r_i, s=j-1; c_{i2js}=0$ при $j > r_i,$
 $s \neq j-1.$

Координата

$$x_{ir}(t) = \frac{1}{q_{ir}} \left[Y_i(t) - \sum_{j=1}^n q_{ij} x_{ij}(t) \right] = \\ = \frac{1}{q_{jr}} Y_i(t) - C_{i3}^T X_{i1}(t) j \neq r_i. \quad (20)$$

Уравнение (19) с учетом (20) примет вид

$$\frac{-A_{i1}}{q_{ir}} Y_i(t) + \frac{C_{i1}}{q_{ir}} \dot{Y}_i(t) - X_i(0) p I(t) = (A_{i2} - A_{i1} C_{i3}^T) \times \\ \times X_{i1}(t) + (C_{i1} C_{i3}^T - C_{i2}) \dot{X}_{i1}(t) + B_i V_i(t). \quad (21)$$

Подставляя в (21) $V_i(t), Y_i(t), I(t), x_{is}(t)$ в виде (2), (9), (6), (16), получим систему алгебраических уравнений для k -го частного решения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{-A_{i1}}{q_{ir}} A_{ik} + \frac{k\omega}{q_{ir}} C_{i1} B_{ik} - X_i(0) k\omega D_{ik} &= (A_{i2} - \\ - A_{i1} C_{i3}^T) [A_{isk}] + (C_{i1} C_{i3}^T - C_{i2}) k\omega [B_{isk}] + B_i P_{ik}; \\ \frac{-A_{i1}}{q_{ir}} B_{ik} - \frac{k\omega}{q_{ir}} C_{i1} A_{ik} &= (A_{i2} - A_{i1} C_{i3}^T) [B_{isk}] - \\ - (C_{i1} C_{i3}^T - C_{i2}) k\omega [A_{isk}] + B_i T_{ik}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

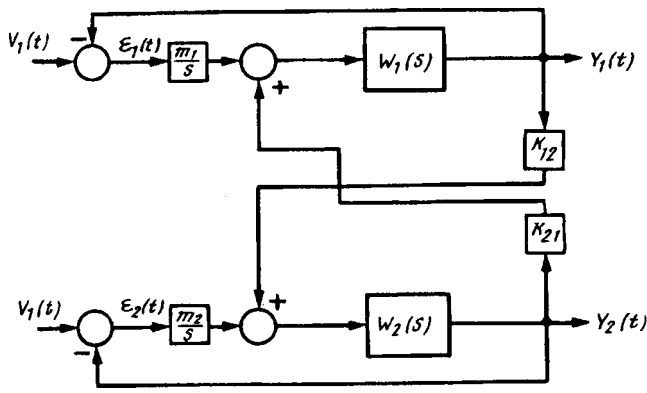


Рис. 8

Решая систему (22), получим вектор

$$[Z_{ik}] = [A_{i1_k} A_{i2_k} \dots A_{is_k} \dots A_{in_k} B_{i1_k} \dots B_{is_k} B_{in_k} P_{ik} T_{ik}],$$

$$s \neq r_i.$$

В качестве примера рассмотрим синтез взаимосвязанной системы стабилизации скорости (рис. 8). В качестве исполнительных элементов i -й сепаратной системы используется двигатель постоянного тока с независимым возбуждением. Задачу решаем при нулевых начальных условиях. Уравнение исполнительного элемента i -й сепаратной системы будет

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_i \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ I_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ b_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ M_i \end{bmatrix}; \quad a_{12} = \frac{k_{ie}}{J_i}; \quad a_{21} = \frac{-k_{ie}}{L_{ia}};$$

$$a_{22} = \frac{-r_{ia}}{L_{ia}}; \quad b_{12} = \frac{-1}{J_i}; \quad b_{21} = \frac{1}{L_{ia}}; \quad Q^T = [10].$$

Здесь n_i , I_i , V_i , M_i — скорость выходного вала двигателя, ток и напряжение якорной цепи, статический момент нагрузки i -й сепаратной системы; J_i , L_{ia} , r_{ia} , k_{ie} — момент инерции нагрузки ротора совместно с моментом инерции нагрузки, приведенным к валу двигателя, индуктивность и сопротивление якорной цепи, конструктивная постоянная исполнительного элемента i -й сепаратной системы.

Законы управления (15) примут вид:

$$V_1 = \frac{(V_{13} - n_1)m_1}{p} + K_{21}n_2 - c_{11}n_1 - c_{12}I_1;$$

$$V_2 = \frac{(V_{23} - n_2)m_2}{p} + K_{12}n_1 - c_{21}n_2 - c_{22}I_2.$$

Уравнение движения системы может быть представлено в виде

$$\begin{bmatrix} p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 & -d_{21}p \\ -d_{12}p & p^3 + t_1p^2 + t_2p + t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_3 & 0 \\ 0 & t_3 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} V_{13}(t) \\ V_{23}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p^2 + a_1p & 0 \\ 0 & p^2 + t_1p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix};$$

$$a_1 = \frac{r_1}{L_1} + \frac{c_{12}}{K_1}; \quad a_2 = \frac{(l_{11} + c_{11})k_{1M}}{L_1 J_1}; \quad a_3 = \frac{m_1 k_{1M}}{L_1 J_1};$$

$$t_1 = \frac{r_2 + c_{22}}{L_2}; \quad t_2 = \frac{(k_{21} + c_{21})k_{2M}}{L_2 J_2}; \quad t_3 = \frac{m_2 k_{2M}}{L_2 J_2};$$

$$d_{21} = \frac{k_{21} k_{1M}}{L_1 J_1}; \quad d_{12} = \frac{k_{12} k_{2M}}{L_2 J_2},$$

где k_{im} — конструктивные постоянные исполнительных элементов.

Уравнения движения $n_i(t)$ и $n_2(t)$ относительно M_1 и M_2 будут:

$$\Delta(p) n_1(t) = -(p^3 + t_1p^2 + t_2p + t_3)(p^2 + a_1p) \frac{M_1}{J_1} -$$

$$- d_{21}p(p^2 + t_1p) \frac{M_2}{J_2};$$

$$\Delta(p) n_2(t) = -(p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3)(p^2 + a_1p) \frac{M_2}{J_2} -$$

$$- d_{12}p(p^2 + a_1p) \frac{M_1}{J_1};$$

$$\Delta(p) = (p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3)(p^3 + t_1p^2 + t_2p + t_3) - d_{12}d_{21}p^2.$$

Из данных выражений следует, что:

система стабилизации скорости будет обладать нулевой статической погрешностью как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям;

при использовании положительных обратных перекрестных связей по выходным координатам возможна коррекция, направленная на поддержание заданного соотношения выходных координат в динамическом режиме работы при скачке возмущающего воздействия, глубина которой определяется коэффициентами k_{21} , k_{12} .

Таким образом задача синтеза сводится к определению $C_1^T = [c_{11} c_{12}]$, $C_2^T = [c_{21} c_{22}]$, m_1 , m_2 при заданных k_{12} и k_{21} .

В качестве желаемой $Y_i^*(t)$ выбираем траекторию, описываемую следующим нормированным дифференциальным уравнением [13]:

$$(p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3) Y_i^*(t) = a_3 I(t); \quad a_1 = 5,023\omega;$$

$$a_2 = 15,8\omega^2; \quad a_3 = 17,98\omega^3. \quad (23)$$

Пусть желаемое время переходного процесса по управляющему воздействию будет $t_y \approx 0,08$ с, что соответствует $\omega = 20$ с⁻¹. Гармоники тригонометрического ряда (9) будут:

$$B_k = \frac{\alpha_3 D_k F_1}{F_1^2 + F_2^2}; \quad A_k = \frac{\alpha_3 D_k F_2}{F_1^2 + F_2^2}; \quad F_1 = -\alpha_1 k^2 + \alpha_3;$$

$$F_2 = k^3 - \alpha_2 k.$$

Матрицы уравнений (19), (22), (15) будут:

$$A_i^T = [0 \ a_{21}]; \quad C_i^T = [1 \ 0]; \quad A_{i2}^T = [a_{12} \ a_{22}];$$

$$C_{i2}^T = [0 \ 1]; \quad B_i^T = [0 \ b_{21}];$$

$$\begin{bmatrix} a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{22} & -k\omega & b_{21} & 0 \\ 0 & a_{12} & 0 & 0 \\ k\omega & a_{22} & 0 & b_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{i2k} \\ B_{i2k} \\ P_{ik} \\ T_{ik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k\omega B_{i1k} \\ -a_{21} A_{i1k} \\ -k\omega A_{i1k} \\ -a_{21} B_{i1k} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} -A_{111} & -A_{121} & \frac{\varepsilon B_{11}}{\omega} \\ -B_{111} & -A_{121} & \frac{\varepsilon A_{11}}{\omega} \\ -A_{113} & -A_{123} & -\frac{\varepsilon B_{13}}{3\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ m_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & -K_{21} A_{211} \\ T_{11} & -K_{21} B_{211} \\ P_{13} & -K_{21} A_{213} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} -A_{211} & -A_{221} & \frac{\varepsilon B_{21}}{\omega} \\ -B_{211} & -A_{221} & \frac{\varepsilon A_{21}}{\omega} \\ -A_{213} & -A_{223} & -\frac{\varepsilon B_{23}}{3\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{21} \\ c_{22} \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{21} & -K_{12} A_{111} \\ T_{21} & -K_{12} B_{111} \\ P_{23} & -K_{12} A_{113} \end{bmatrix}.$$

Пусть $J_1=J_2=0,001611$ кг·м²; $r_1=r_2=2,5$ Ом;
 $L_1=L_2=0,0324$ Гн; $k_{11}=k_{21}=0,4377$ $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; $k_{1m}=$
 $=k_{2m}=0,322$ $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}$.

Решение системы (17) дает:

при $k_{12}=k_{21}=0$

$$c_{11}=c_{21}=0,61; \quad c_{12}=c_{22}=0,784; \quad m_1=m_2=23,837;$$

при $k_{12}=k_{21}=1$

$$c_{11}=c_{21}=1,6093; \quad c_{12}=c_{22}=0,845; \quad m_1=m_2=23,831;$$

при $k_{12}=k_{21}=10$

$$c_{11}=c_{21}=10,609; \quad c_{12}=c_{22}=0,845; \quad m_1=m_2=23,831;$$

при $k_{12}=k_{21}=30$

$$c_{11}=c_{21}=30,609; \quad c_{12}=c_{22}=845; \quad m_1=m_2=23,831.$$

На рис. 9 представлены графики $Y_i^*(t)$, соответствующие уравнению (23) (кривая 1), и $Y_i(t)$ при $k_{12}=k_{21}=30$ (кривая 2); динамические

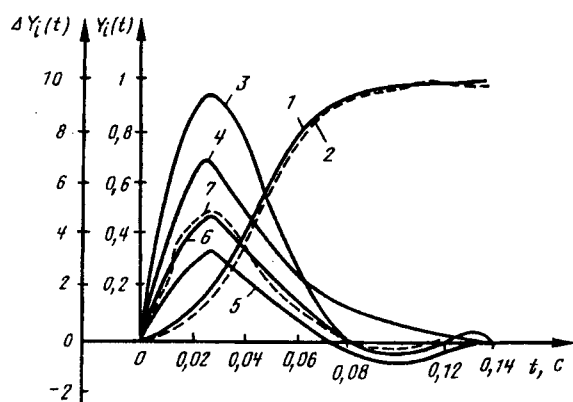


Рис. 9

погрешности: $\Delta n_1(t)$ на воздействие скачка возмущения $M_i=1(t)$ при $k_{12}=k_{21}=0$ (кривая 3); $\Delta n_1(t)$ и $\Delta n_2(t)$ на воздействие скачка возмущения $M_i=1(t)$ при $k_{12}=k_{21}=1$ (кривые 4, 5); $\Delta n_1(t)$ и $\Delta n_2(t)$ на воздействие скачка возмущения $M_i=1(t)$ при $k_{12}=k_{21}=30$ (кривые 6, 7).

Из анализа рис. 9 следует, что:

увеличение глубины обратных положительных перекрестных связей благоприятно влияет на значение динамической погрешности $\Delta n_1(t)$, $\Delta n_2(t)$ при воздействии скачка возмущающего воздействия;

при $k_{12}=k_{21} \geq 10$ коэффициент соотношения выходных координат в динамическом режиме близок к единице.

Аналогичные результаты получаются при синтезе непосредственно по структурной схеме рис. 8. В данном случае

$$W_1(s) = \frac{1}{d_0 s^2 + d_1 s + d_2}; \quad W_2(s) = \frac{1}{c_0 s^2 + c_1 s + c_2};$$

$$d_0 = \frac{L_1 J_1}{k_{1m}}; \quad d_1 = \frac{J_1 r_1 + J_1 C_{12}}{k_{1m}}; \quad d_2 = k_{1e} + C_{11};$$

$$C_0 = \frac{L_2 J_2}{k_{2m}}; \quad c_1 = \frac{J_2 r_2 + J_2 C_{22}}{k_{2m}}; \quad c_2 = k_{2e} + C_{21}.$$

При этом задача синтеза заключается в определении векторов

$$z_1 = [d_1 \ d_2 \ m_1]^T; \quad z_2 = [c_1 \ c_2 \ m_2]^T$$

из условия (7) при заданных k_{12} и k_{21} .

Подставляя в уравнения

$$(d_0 p^2 + d_1 p + d_2) n_1(t) = m_1 \int [V_{13}(t) - n_1(t)] dt + K_{21} n_2(t);$$

$$(c_0 p^2 + c_1 p + c_2) n_2(t) = m_2 \int [V_{23}(t) - n_2(t)] dt + K_{12} n_1(t)$$

и $V_{13}(t)$, $Y_i(t)$ в виде (6), (9) и сравнивая полиномы при одинаковых функциях времени, получим систему алгебраических уравнений для нахождения d_i , c_i , m_i :

$$\begin{bmatrix} B_{11}\omega & A_{11} & \frac{D_{11}-B_{11}}{\omega} \\ -A_{11}\omega & B_{11} & \frac{A_{11}}{\omega} \\ 3\omega B_{13} & A_{13} & \frac{D_{13}-B_{13}}{3\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ m_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{21} A_{21} + d_0 A_{11} \omega^2 \\ K_{21} B_{21} + d_0 B_{11} \omega^2 \\ K_{21} A_{23} + d_0 A_{13} 9\omega^2 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} B_{21}\omega & A_{21} & \frac{D_{21}-B_{21}}{\omega} \\ -A_{21}\omega & B_{21} & \frac{A_{21}}{\omega} \\ 3\omega B_{23} & A_{23} & \frac{D_{23}-B_{23}}{3\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{12} A_{11} + c_0 A_{21} \omega^2 \\ K_{12} B_{11} + c_0 B_{21} \omega^2 \\ K_{12} A_{13} + c_0 A_{23} 9\omega^2 \end{bmatrix}.$$

При $k_{12}=k_{21}=30$ имеем $Z_1^T=Z_2^T=[0,017, 31,047, 23,831]$. Графики $n_i(t)$, $\Delta n_i(t)$ совпадают с кривыми 2, 6, 7 приведенными на рис. 9.

В заключение отметим следующее. Рассмотренный подход обеспечивает с необходимой для практики точностью реализацию желаемой вектор-функции выходных координат, а также обеспечивает значительное упрощение задачи синтеза за счет отсутствия итерационных процедур поиска минимума функционала, характеризующего степень приближения реальной вектор-функции выходных координат к желаемой, а сами результаты синтеза могут рассматриваться как хорошее нулевое приближение в задачах оптимизации функционала (7). При этом задача синтеза может быть решена по частотным характеристикам, т.е. без использования полной математической модели управляемого объекта i -й сепаратной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. — М.: Энергия, 1970.
2. Баранчук Е.И. Взаимосвязанные и многоконтурные регулируемые системы. — Л.: Энергия, 1968.
3. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели. — М.: Наука, 1987.
4. Крутько П.Д., Максимов А.И., Скворцов Л.М. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем. — М.: Радио и связь, 1988.
5. Андреев С.Н., Ворошилов М.С., Петров Б.А. Проектирование приводов манипуляторов. — Л.: Машиностроение, 1975.
6. Лихоманов А.М. Параметрический синтез линейных систем на основе искусственной периодизации переходных характеристик. — Изв. вузов. Приборостроение, 1990, № 2.
7. Лихоманов А.М. Параметрический синтез систем с кусочно-непрерывными нелинейностями на основе искусственной периодизации сигнала ошибки управления. — Изв. вузов. Приборостроение, 1991, № 7.
8. Лихоманов А.М., Дмитриев Б.Ф. Частотный подход к решению обратных задач динамики. Линейные одномерные модели. — Изв. вузов. Электромеханика, 1993, № 4.
9. Лихоманов А.М., Тарасов С.В. Структурно-параметрический синтез законов управления вынужденным движением. — Изв. вузов. Приборостроение, 1994, № 4.
10. Лихоманов А.М., Власов В.И. Синтез стандартных настроек для следящих электроприводов при линейном управляющем воздействии. — Электротехника, 1995, № 1.
11. Лихоманов А.М., Куцанов Л.А. Синтез стандартных настроек для следящих электроприводов по назначенным переходным характеристикам. — Электричество, 1995, № 7.
12. Лихоманов А.М., Егоршин В.П. Частотный подход к построению переходных процессов в линейных многомерных системах. — Изв. вузов. Электромеханика, 1995, № 5—6.
13. Лихоманов А.М., Панин С.Ю., Писарев А.Ю. Синтез стандартных настроек для систем стабилизации скорости. — Электротехника, 1996, № 1.
14. Лихоманов А.М., Огурцов Д.Н., Шевчук Б.И., Сушлова О.В. Синтез цифровых фильтров по переходной функции аналогового прототипа. — Изв. вузов. Электромеханика, 1996, № 5—6.
15. Лихоманов А.М., Панин С.Ю., Писарев А.Ю., Сушлова О.В. Синтез программных управлений для систем электропривода на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики. — Электротехника, 1997, № 7.
16. Лихоманов А.М., Панин С.Ю., Писарев А.Ю. Синтез следящих электроприводов на основе частотного подхода. — Электричество, 1997, № 1.

[21.01.98]

Авторы: Лихоманов Андрей Михайлович окончил приборостроительный факультет Ленинградского института авиационного приборостроения в 1975 г. В 1991 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Параметрический синтез следящих электроприводов на основе искусственной периодизации переходных характеристик» в С.-Петербургском техническом университете. Доцент кафедры автоматизации производственных систем С.-Петербургского института машиностроения (ВТУЗ-ЛМЗ).

Дмитриев Борис Федорович окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) в 1972 г. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и разработка преобразований переменного напряжения в постоянное с непосредственной связью и многократной коммутацией» в Ленинградском институте точной механики. Доцент кафедры электротехники и электрооборудования судов С.-Петербургского морского технического университета.

Панин Сергей Юрьевич студент С.-Петербургского института машиностроения (ВТУЗ-ЛМЗ).

Писарев Алексей Юрьевич студент С.-Петербургского института машиностроения (ВТУЗ-ЛМЗ).

Индуктивное влияние на линии связи электрической тяговой сети с продольными отсасывающими трансформаторами

РОЗАНОВ В.А.

Приведена методика расчета индуктивного влияния на линии связи железных дорог переменного тока с продольными отсасывающими трансформаторами, предложенная методика отличается от известных. Обращено серьезное внимание на учет индуктивного сопротивления обмоток отсасывающих трансформаторов.

Ключевые слова: электрическая тяговая сеть, линии связи, отсасывающие трансформаторы, индуктивное влияние, расчет

Отсасывающие трансформаторы (ОТ) предназначены для уменьшения индуктивного влияния электрической тяги переменного тока. Они представляют собой силовые трансформаторы мощностью в несколько сотен киловатт-ампер с коэффициентом трансформации, равным единице. Обмотки отсасывающих трансформаторов могут включаться в провод тяговой сети продольно и шлейфно. На рис. 1 показаны примеры продольного и шлейфного включения отсасывающих трансформаторов.

При продольном включении отсасывающих трансформаторов с обратным проводом первичные обмотки включаются в рассечку контактной сети, а вторичные — в рассечку обратного провода, который в середине между соседними трансформаторами соединяется с рельсами. При шлейфном включении, первичные обмотки включа-

A method for calculating the inductive influence of AC railways on communication lines is presented. The method proposed differs from the known ones significantly. A special attention is paid to taking into account the inductive reactance of bust transformer windings.

Key words: electric traction network, communication lines, bust transformers, inductive influence

ются между проводом питающей линии и контактной сетью, а вторичные обмотки — между обратным проводом и рельсами.

В тяговой сети с продольными отсасывающими трансформаторами рис. 1, а функционируют три тока: I_K — контактной сети; I_O — обратного тока и I_P — рельсов. Под током I_P подразумевается ток, который после электровоза возвращается на тяговую подстанцию по рельсам и земле, минуя обратный провод.

Ток контактного провода состоит из суммы обратного и тока рельсов: $I_K = I_O + I_P$. Ток обратного провода протекает по цепи: тяговая подстанция, контактный провод, первичная обмотка отсасывающего трансформатора, электровоз, вторичная обмотка отсасывающего трансформатора, обратный провод, тяговая подстанция. Индуктивная связь первичной и вторичной обмоток ОТ нейтрализует индуктивные сопротивления этих обмоток. В результате индуктивные сопротивления обмоток отсасывающих трансформаторов не создают препятствия для прохождения обратного тока. Теоретический анализ причин уменьшения индуктивного влияния тяговых сетей при установке отсасывающих трансформаторов приведен в [1].

Ток рельсов протекает по цепи: электровоз, рельсы и земля, тяговая подстанция, контактный провод, первичная обмотка отсасывающего трансформатора, электровоз. В этой цепи первичная обмотка ОТ работает в режиме дросселя. Создается большое сопротивление для прохождения тока рельсов.

Сумма падений напряжения и действующих ЭДС в замкнутом контуре равна нулю, и от перестановки слагаемых ее элементов результат не изменится. Исходя из этого рис. 2, в контуре прохождения токов рельсов индуктивное сопротивление первичной обмотки ОТ перенесено из

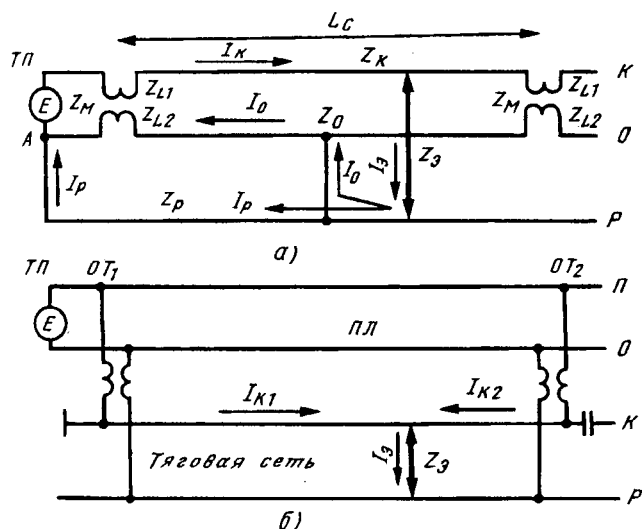


Рис. 1. Схема тяговой сети: а — с продольным включением отсасывающих трансформаторов; б — со шлейфным включением отсасывающих трансформаторов; О — отсасывающий (фидерный) провод; К — контактный провод; Р — рельсы; П — питающая линия

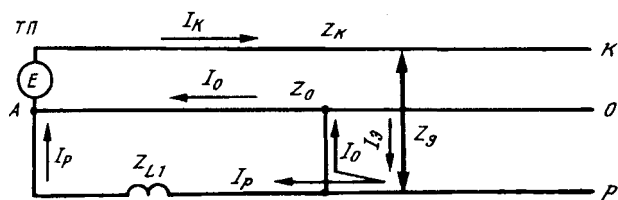


Рис. 2. Схема замещения тяговой сети с продольным включением отсасывающих трансформаторов

контактного провода в рельсы.

Обратный ток I_O на отрезке AB (рис. 2) проходит по обратному проводу сопротивлением Z_O . На этом же участке AB ток рельсов I_P проходит по первичной обмотке отсасывающего трансформатора, встречая большое сопротивление, равное Z_{L1} . Сопротивление рельсов в этой цепи не учитывается, так как оно значительно меньше индуктивного сопротивления первичной обмотки ОТ: $Z_P \ll Z_{L1}$.

Соотношение токов рельсов и обратного провода не зависит от суммы этих токов [2]. Это соотношение является функцией параметров тяговой сети. В первую очередь данное соотношение зависит от индуктивного сопротивления обмотки ОТ и длины секции, так как длина секции L_c определяет общее сопротивление Z_O обратного провода на участке секции. Результирующий ток рельсов и ток обратного провода определяется из выражений:

$$I_P = I_\Phi \frac{Z_O}{Z_{L1} + Z_O}; \quad I_O = I_\Phi \frac{Z_{L1}}{Z_{L1} + Z_O}.$$

Здесь Z_O — суммарное сопротивление цепи обратного провода на участке секции; I_Φ — результирующий ток тяговой подстанции одного фидера (одного пути).

Ток рельсов проходит в одном направлении по контактному проводу и в другом — по рельсам (земля). Система прохождения этого тока аналогична прохождению тока однофазной тяговой сети при вынужденном режиме ее работы. Расчет индуктивного влияния тока рельсов производится по формуле (6.5) из [3]:

$$U_P = K_\Phi \omega M_K I_P K_m l_3 S_P,$$

где U_P — индуцируемое напряжение в линии связи от тока рельсов; K_Φ — коэффициент, характеризующий увеличение индуктивного влияния вследствие несинусоидальности тока тяговой сети; ω — угловая частота влияющего тока; M_K — взаимная индуктивность между контактным проводом и линией связи; I_P — результирующий

ток рельсов: $I_P = I_\Phi \frac{Z_O}{Z_{L1} + Z_O}$; K_m — коэффициент, характеризующий уменьшение эквивалентного влияющего тока по сравнению с результирующим током тяговой подстанции; l_3 — длина сближения; S_P — коэффициент защитного действия (КЗД) рельсов.

Ток обратного провода в одном направлении проходит по контактной сети и в другом направлении — по обратному проводу. Во внешней среде создается эффект нейтрализации индуктивного влияния, что видно из следующего выражения для индуцируемого напряжения в линии связи током I_O :

$$U_O = K_\Phi \omega (M_K - M_O) I_O K_m l_3 S_P',$$

где I_O — результирующий ток обратного провода:

$$I_O = I_\Phi \frac{Z_{L1}}{Z_{L1} + Z_O};$$

M_O — взаимная индуктивность между обратным проводом и линией связи; S_P' — КЗД рельсов для двухпроводной линии электропитания.

Ток местной составляющей I_3 электропитания электровозов действует в границах секций. Из рис. 3 видно, что перемычка внутри секции соединяет обратный провод с рельсами в середине секции. В результате при сближении линии связи на протяжении всей длины секции L_c нескомпенсированное индуктивное воздействие создается только на половине длины секции, т.е. $l_3 = 0,5 L_c$.

Индуцируемое напряжение U_c при сближении

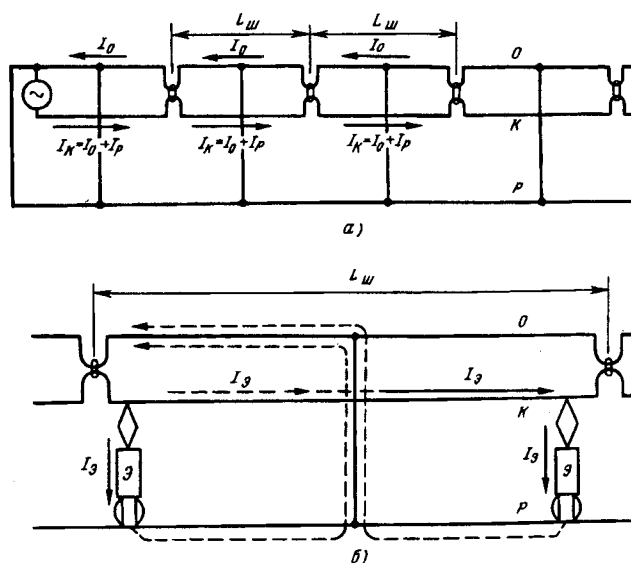


Рис. 3. Схема распределения токов в тяговой сети с отсасывающими трансформаторами: а — транзитной составляющей; б — местной составляющей

линии связи на протяжении одной секции определяется также по формуле (6.5) из [3]:

$$U_c = K_\phi \omega M_k I_\phi (0,5L_c) S_p = 0,5K_\phi \omega M_k L_c \frac{I_\phi}{m_1} S_p',$$

где I_ϕ — результирующий ток тяговой подстанции одного фидера (одного пути); m_1 — число электровазов на одном пути в пределах плеча питания.

На протяженных сближениях линия связи проходит вдоль нескольких секций. Длина воздействия тока на этих секциях может изменяться от нуля до $0,5L_c$. Так же в зависимости от местонахождения электровазов на секциях индуктивное влияние тока I_ϕ может возникать или от тока контактного провода, или от тока обратного провода. Суммарное их действие создает взаимно компенсирующий эффект. Указанные факторы сокращают индуцируемые напряжения в линиях связи, что учитывается в расчетах коэффициентом D , который меньше единицы.

Индуктивное влияние токов местной составляющей I_ϕ возникает только на тех секциях, где находятся электровазы, что учитывается соотношением m_1/n_1 (n_1 — число секций на тяговом плече одного пути). Число секций на длине сближения определяется соотношением l_ϕ/L_c . С учетом приведенного составлена формула расчета индуктивного влияния местного тока на протяженных длинах сближения:

$$U_m = U_c \frac{l_\phi}{L_c} \frac{m_1}{n_1} D = \left(0,5K_\phi \omega M_k L_c \frac{I_\phi}{m_1} S_p \right) \frac{l_\phi}{L_c} \frac{m_1}{n_1} D = 0,5K_\phi \omega I_\phi L_c \frac{l_\phi}{l_r} S_p M_k D,$$

$$\text{где } \frac{1}{n_1} = \frac{L_c}{l_r}.$$

Общее напряжение, наводимое в линии связи при вынужденном режиме работы тяговой сети с продольными ОТ, U_b равно сумме влияний тока рельсов, обратного провода и местного тока электропитания электровазов:

$$U_b = \Phi (U_p + U_o + U_m) = \Phi \left[K_\phi \omega I_\phi \frac{Z_o}{Z_{L1} + Z_o} K_m \times \times I_\phi S_p M_k + K_\phi \omega I_\phi \frac{Z_{L1}}{Z_{L1} + Z_o} K_m I_\phi S_p' (M_k - M_o) + + 0,5K_\phi \omega I_\phi L_c \frac{l_\phi}{l_r} S_p M_k D \right], \quad (1)$$

где Φ — число фидеров (путей).

Далее приведен пример расчета индуктивного

влияния тяговой сети с продольным включением обмоток отсасывающих трансформаторов.

Исходные данные: длина сближения линии связи $l_\phi = 18$ км; ширина сближения $a = 30$ м; начало сближения $l_n = 12$ км; длина плеча питания $l_r = 32$ км; длина секций $L_c = 4$ км; участок — двухпутный, число поездов на двухпутном участке $m = 8$ и на одном пути $m_1 = 4$; результирующий ток тяговой подстанции 1706 А и одного пути 853 А; проводимость земли $\delta = 0,05$ Сим/м; $K_m = 0,426$; индуктивное сопротивление обмоток отсасывающих трансформаторов $Z_{L1} = 70$ Ом (в режиме холостого хода) [4]; $M_k = 551,650 \times 10^{-6}$ Гн/км; $M_o = 555,361 \cdot 10^{-6}$ Гн/км.

Сопротивление обратного провода

$$Z_o' = 0,22 + j0,746 = |0,8| \text{ Ом/км:}$$

ток рельсов

$$I_p = 853 \frac{0,8 \cdot 4}{70 + 0,8 \cdot 4} = 37 \text{ А;}$$

ток обратного провода

$$I_o = 853 \frac{70}{70 + 0,8 \cdot 4} = 816 \text{ А.}$$

По формуле (1) определяется индуцируемое напряжение в линии связи при вынужденном режиме работы тяговой сети с продольным включением отсасывающих трансформаторов:

$$U_b = 2[1,5 \cdot 314 \cdot 37 \cdot 0,426 \cdot 18 \cdot 0,491 \cdot 551,658 \cdot 10^{-6} + + 1,15 \cdot 314 \cdot 816 \cdot 0,426 \cdot 0,9(551,658 - 555,361) \times \times 10^{-6} + 18 + 0,5 \cdot 1,15 \cdot 314 \cdot 853 \cdot 4 \cdot \frac{18}{32} \cdot 0,491 \times \times 551,658 \cdot 10^{-6} \cdot 0,75] = 2(28 - 7,5 + 70,5) = 182 \text{ В.}$$

Индуктивное влияние однофазной тяговой сети на аналогичную линию связи:

$$U_{од} = \Phi (K_\phi \omega M_k I_\phi K_m l_m S_p) = 2(1,15 \cdot 314 \times \times 551,658 \cdot 10^{-6} \cdot 853 \cdot 0,426 \cdot 18 \cdot 0,491) = 1279 \text{ В.}$$

Коэффициент защитного действия тяговой сети с продольным включением отсасывающих трансформаторов

$$КЗД = \frac{U_b}{U_{од}} = \frac{182}{1279} = 0,14.$$

Такой коэффициент, равный 0,14, является обычным для тяговых сетей с продольным включением отсасывающих трансформаторов и его

можно улучшить примерно в 2 раза, подвесив на опорах контактной сети заземленный провод в середине между контактным и обратным проводами. Заземленный провод выравнивает внешние магнитные поля контактного и обратного проводов. Токи контактного и обратного проводов направлены встречно. Разность токов контактного и обратного проводов индуцирует в заземленном проводе ток, который создает эффект уменьшения индуктивного влияния.

Анализируя факторы, способствующие сокращению индуктивного влияния становится очевидным, что доминирующим является значение индуктивного сопротивления обмоток отсасывающих трансформаторов.

Разработанный способ расчета индуктивного влияния тяговой сети с отсасывающими трансформаторами прост и учитывает все факторы, способ-

ствующие снижению индуктивного влияния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов В.А. Причины уменьшения индуктивного влияния тяговых сетей при отсасывающих трансформаторах. — Электричество, 1995, № 5.
2. Розанов В.А. Трехфазные отсасывающие трансформаторы. — Электричество, 1995, № 12.
3. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговых сетей электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1989.
4. Павлов И.В. Отсасывающие трансформаторы в тяговых сетях переменного тока. — М.: Транспорт, 1965.

[14.01.98]

Автор: Розанов Валерий Алексеевич окончил факультет электропроводной связи Московского института связи в 1940 г. Работал главным специалистом института «Трансэлектронпроект». Пенсионер.

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов стран СНГ и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира на русском и английском языках. Реклама в черно-белом изображении может быть помещена на страницах журнала или на его обложке. Напоминаем наш адрес: 103012 Москва, К—12, Б. Черкасский пер., 2/10 или 101000 Москва, Главпочтамт, абонементный ящик № 648. Телефоны для справок: 924-24-80, 928-88-69.

Вариационные оценки в электростатике. Принцип Гаусса, эквивалентные заряды и мультиполи

КАЗАНЦЕВ В.П., ЛЫСЕНКО Е.А.

В статье показано, как можно известную формулировку принципа Гаусса распространить на более широкие классы электростатических задач и на ее основе развить методы получения оценок снизу для матриц емкостных коэффициентов систем проводников. Особенностью данного исследования является попытка выразить оценки емкостных коэффициентов систем проводников через интегральные энергетические характеристики уединенных проводников и использовать их для последовательного улучшения этих оценок разложения по мультиполям уединенных проводников. Рассмотрены задачи о матрице емкостных коэффициентов системы двух проводников произвольной формы, один из которых целиком содержится внутри другого, а также произвольной системы многих шаров.

Ключевые слова: электростатика, принцип Гаусса, система проводников, емкостные коэффициенты, расчеты

Введение. Вариационные методы в теоретической физике зачастую являются единственным средством исследования сложных задач. Примерами здесь могут служить метод Хартри—Фока в квантовой механике [1], задача о спектре атома гелия [2] и др. С другой стороны, вариационные принципы позволяют представить физические теории в весьма удобной форме, дают возможность получать физические законы и уравнения в ковариантном виде, например, в лагранжевой механике [3], теории поля [4]. Поэтому развитие вариационных методов в различных разделах теоретической физики, как правило, всегда оказывается плодотворным.

Совместить две привлекательные стороны вариационных методов как средства получения уравнений в ковариантном виде и как средства решения сложных задач оказалось возможным при построении «Аналитической электростатики». Задача построения аналитической электростатики была поставлена В.П. Казанцевым в публикации [5], более чем в 40 работах В.П. Казанцева с сотрудниками развивались различные разделы аналитической электростатики [6, 7]. В настоящее время исследуются другие возможности использования вариационных методов для решения сложных задач электростатики [8, 9]. Продолжением этих исследований служит настоящая статья.

Здесь мы покажем, как можно известную формулировку принципа Гаусса [10] распространить на более широкие классы электростатических за-

The paper demonstrates how the known formulation of the Gaussian principle can be extended to a wider class of electrostatic problems. It is also shown how methods of estimation from below for matrices of the capacitance coefficients of systems of conductors can be developed on the basis of this formulation. The specifics of this study is the attempt to express the estimates of the capacitance coefficients of systems of conductors in terms of the integral energy characteristics of isolated conductors and to use expansion in terms of the multipoles of the isolated conductors in order to successively improve these estimates. The paper considers the problem of the matrix of the capacitance coefficients of a system of two conductors of arbitrary shape, when one conductor is entirely inside the other, and the problem of an arbitrary system of many spheres.

Key words: electrostatics, Gaussian principle, system of conductors, capacitance coefficients, calculations

дач и на основе этой формулировки развить методы получения оценок снизу для матриц емкостных коэффициентов систем проводников. Существенно при этом то обстоятельство, что оценки емкостных коэффициентов систем проводников удастся в некоторых случаях выразить через интегральные энергетические характеристики уединенных проводников и использовать для последовательного улучшения этих оценок разложения по мультиполям уединенных проводников.

Пусть система из N проводников с зарядами Q_α ($\alpha=1, 2, \dots, N$) помещена во внешнее поле, создаваемое лежащими вне проводников зарядами, которые характеризуются объемной плотностью ρ . На основании принципа Гаусса¹ можно утверждать, что всевозможные распределения зарядов Q_α по поверхностям ∂V_α проводников будут создавать во всем пространстве совместно с внешними зарядами такое электростатическое поле, энергия которого будет минимальна для истинного распределения потенциала. Действительно, обозначим через φ_0 и φ истинный и пробный потенциалы и сравним соответствующие им электростатические энергии, обозначаемые как $W(\varphi)$ и $W(\varphi_0)$, где

$$W(\varphi) = \frac{\epsilon_0}{2} \int (\nabla\varphi)^2 dV. \quad (1)$$

Здесь интегрирование проводится по всей об-

¹ Принцип Гаусса обычно формулируют для частой задачи о емкости проводника [10].

ласти пространства Ω . Для выполнения такого сравнения запишем непосредственно проверяемое тождество:

$$W(\varphi) = W(\varphi_0) + W(\varphi - \varphi_0) + \varepsilon_0 \int_{\Omega} \nabla \varphi_0 \nabla (\varphi - \varphi_0) dV. \quad (2)$$

Заметим, что интеграл в правой части этого тождества может быть преобразован к виду

$$\varepsilon_0 \int_{\Omega} \nabla \varphi_0 \nabla (\varphi - \varphi_0) dV = -\varepsilon_0 \int_{\Omega - \partial V_{\alpha}} \varphi_0 \Delta (\varphi - \varphi_0) dV +$$

$$+ \sum_{\alpha=1}^N \int_{\partial V_{\alpha}} \varphi_0 (\sigma_{0\alpha} - \sigma_{\alpha}) ds,$$

где $\sigma_{0\alpha}$ — истинное распределение заряда Q_{α} по поверхности α -го проводника; σ_{α} — пробное распределение заряда.

Поскольку в области вне проводника

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_0 = -\rho/\varepsilon_0,$$

а внутри его области

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_0 = 0,$$

$$\int_{\partial V_{\alpha}} \sigma_{0\alpha} ds = \int_{\partial V_{\alpha}} \sigma_{\alpha} ds = Q_{\alpha}, \quad \varphi_0|_{\partial V_{\alpha}} = U_{\alpha},$$

где U_{α} — постоянный потенциал α -го проводника, то нетрудно увидеть, что интеграл в правой части тождества (2) равен нулю.

Таким образом, имеем

$$W(\varphi) - W(\varphi_0) = W(\varphi - \varphi_0) \geq 0,$$

что и доказывает принцип Гаусса.

В частности, в отсутствие внешних зарядов электростатическая энергия может быть выражена через матрицу емкостных коэффициентов \hat{C} и заряды проводников:

$$W(\varphi_0) = \frac{1}{2} Q \hat{C}^{-1} Q; \quad Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_N).$$

Допустим, что распределение заряда по α -му проводнику складывается из L_{α} различных распределений зарядов, так что

$$\sigma_{\alpha} = \sum_{k=1}^{L_{\alpha}} q_{\alpha k} \sigma_{\alpha k}; \quad \int_{\partial V_{\alpha}} \sigma_{\alpha k} ds = 1; \quad \sum_{k=1}^{L_{\alpha}} q_{\alpha k} = Q_{\alpha}, \quad (3)$$

причем $\sigma_{\alpha k}$ ($k=1, 2, \dots, L_{\alpha}$) образуют на поверхности проводника ∂V_{α} систему линейно независимых функций. Обозначим потенциал, создаваемый k -й системой зарядов α -проводника $q_{\alpha k} \varphi_{\alpha k}$, а потенциал зарядов всех проводников —

$$\varphi = \sum_{\alpha=1}^N \sum_{k=1}^{L_{\alpha}} q_{\alpha k} \varphi_{\alpha k}, \quad (4)$$

$$\text{где } \varphi_{\alpha k}(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_{\partial V_{\alpha}} \frac{\sigma_{\alpha k}(r')}{|r-r'|} ds'.$$

Тогда согласно принципу Гаусса [10] имеет место неравенство

$$\frac{1}{2} Q \hat{C}^{-1} Q \leq W(\varphi) = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_{\Omega} (\nabla \varphi)^2 dV, \quad (5)$$

где интегрирование проводится по области всего пространства Ω :

$$Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_N);$$

\hat{C} — матрица емкостных коэффициентов рассматриваемой системы из N проводников.

После подстановки φ из формулы (4) в функционал $W(\varphi)$ и проведения интегрирования найдем:

$$W(\varphi) = \frac{1}{2} q \hat{A} q; \quad q = (q_1, q_2, \dots, q_N);$$

$$q_{\alpha} = (q_{\alpha 1}, q_{\alpha 2}, \dots, q_{\alpha L_{\alpha}});$$

$$A_{\alpha i \beta j} = \varepsilon_0 \int_{\Omega} \nabla \varphi_{\alpha i} \nabla \varphi_{\beta j} dV.$$

С другой стороны,

$$A_{\alpha i \beta j} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_{\partial V_{\alpha}} \int_{\partial V_{\beta}} \frac{\sigma_{\alpha i}(r) \sigma_{\beta j}(r')}{|r-r'|} ds ds'.$$

Условия (3), при которых следует проводить минимизацию функционала $W(\varphi)$, удобно переписать в виде

$$q e_{\alpha} = Q_{\alpha}, \quad (6)$$

где e_{α} — вектор, полученный из вектора q заменой всех q_{β} ненулевыми векторами за исключением q_{α} , на место которого поставлен вектор с компонентами, равными единице.

Минимизируя $W(\varphi)$ по $q_{\alpha k}$ при условиях (6) с помощью неопределенных множителей Лагранжа, получаем

$$W(\varphi) = \frac{1}{2} Q \hat{B}^{-1} Q; \quad B_{\alpha\beta} = e_{\alpha} \hat{A}^{-1} e_{\beta}.$$

Возвращаясь к неравенству (5), видим, что матрица \hat{B} является оценкой матрицы \hat{C} снизу:

$$\hat{C} \geq \hat{B},$$

в том смысле [11], что разность $\hat{C} - \hat{B}$ будет неотрицательно определенной матрицей. Отметим, что операция обращения симметричных матриц \hat{A} и \hat{B} всегда выполнима, поскольку эти матрицы положительно определенные.

Примеры оценок матрицы емкостных коэффициентов. Простые оценки получаются, если в качестве пробного выбирают такое распреде-

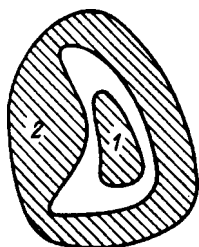


Рис. 1

ление заряда по поверхности, которое реализуется в случае уединенного проводника. Так, для системы непересекающихся шаров имеем следующую оценку для матрицы потенциальных коэффициентов:

$$\hat{C}^{-1} \leq \hat{S}, \quad (7)$$

где $S_{ii} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{a_i}$; $S_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{l_{ij}}$ ($i \neq j$); a_i — радиус i -го шара; l_{ij} — расстояние между центрами i -го и j -го шаров.

В задаче о матрице емкостных коэффициентов системы двух проводников, один из которых целиком содержится внутри другого (рис. 1), указанным путем получаем оценку

$$\hat{C}^{-1} \leq \begin{pmatrix} \frac{1}{C_2^{(2)}} - \frac{1}{C_2^{(1)}} + \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_2^{(2)}} \\ \frac{1}{C_2^{(2)}} & \frac{1}{C_2^{(2)}} \end{pmatrix},$$

где C_1 — емкость внутреннего проводника, рассматриваемого как уединенный; $C_2^{(1)}$ и $C_2^{(2)}$ — емкости уединенных проводников, поверхности которых совпадают, соответственно, с внутренней и внешней поверхностями второго проводника.

Заметим, что подобным образом в статье [12] была найдена оценка снизу для емкости конденсатора, образованного первым и вторым проводниками:

$$C \leq \frac{C_2^{(1)} C_1}{C_2^{(1)} - C_1}. \quad (8)$$

Для системы шаров, чтобы проще вычислять матричные элементы $A_{\alpha\beta j}$, удобно в качестве $\sigma_{\alpha i}$ выбирать распределение зарядов, создающих вне сферы такое же электрическое поле, что и точечный заряд, расположенный внутри α -го шара в точке $r_{\alpha i}$. Тогда нетрудно найти, что

$$\begin{aligned} A_{\alpha\alpha i} &= \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{\frac{a_\alpha}{r_{\alpha i}^{(\alpha)}}}{\left| r_{\alpha i}^{(\alpha)} - \left(\frac{a_\alpha}{r_{\alpha i}^{(\alpha)}} \right)^2 r_{\alpha i}^{(\alpha)} \right|} = \\ &= \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{a_\alpha}{a_\alpha^2 - (r_{\alpha i}^{(\alpha)})^2}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$A_{\alpha\alpha j} = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{\frac{a_\alpha}{r_{\alpha j}^{(\alpha)}}}{\left| r_{\alpha i}^{(\alpha)} - \left(\frac{a_\alpha}{r_{\alpha j}^{(\alpha)}} \right)^2 r_{\alpha j}^{(\alpha)} \right|} =$$

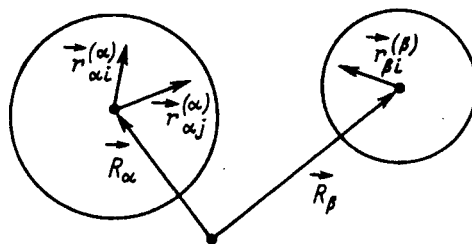


Рис. 2

$$= \frac{1}{8\pi\epsilon_0} a_\alpha^2 [a_\alpha^4 - 2a_\alpha^2 r_{\alpha i}^{(\alpha)} r_{\alpha j}^{(\alpha)} + (r_{\alpha i}^{(\alpha)} r_{\alpha j}^{(\alpha)})^2]^{-\frac{1}{2}}; \quad (10)$$

$$A_{\alpha\beta j} = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{|r_{\alpha i} - r_{\beta j}|}. \quad (11)$$

Принятые здесь обозначения соответствуют рис. 2. В данном случае, минимизируя электростатическую энергию (1) также и по положению зарядов, можно улучшить оценку $S = \hat{C}^{-1}$. Так, для системы двух одинаковых шаров и системы трех одинаковых шаров, центры которых расположены в вершинах правильного треугольника, оценки матрицы потенциальных коэффициентов для нескольких расстояний между центрами (L/R) шаров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расстояние между центрами L/R	Значение потенциальных коэффициентов			
	Простейшие оценки типа (7) \hat{S}_s		Оценки, соответствующие (9)–(11), \hat{S}	
	S_{ii}	S_{ij}	S_{ii}	S_{ij}
Для системы двух шаров				
2,5	1,0000	0,4000	0,9474	0,3851
3,0	1,0000	0,3333	0,9859	0,3346
4,0	1,0000	0,2500	0,9947	0,2491
5,0	1,0000	0,2000	0,9983	0,2000
7,0	1,0000	0,1429	0,9996	0,1429
10,0	1,0000	0,1000	0,9999	0,1000
30,0	1,0000	0,0333	0,9999	0,0333
50,0	1,0000	0,0200	0,9999	0,0200
Для системы трех шаров				
2,5	1,0000	0,4000	0,9411	0,3962
3,0	1,0000	0,3333	0,9732	0,3295
4,0	1,0000	0,2500	0,9918	0,2484
5,0	1,0000	0,2000	0,9967	0,1993
7,0	1,0000	0,1429	0,9992	0,1427
10,0	1,0000	0,1000	0,9998	0,0999
30,0	1,0000	0,0333	0,9999	0,0333
50,0	1,0000	0,0200	0,9999	0,0199

Примечание. Все значения умножены на коэффициент $4\pi\epsilon_0 R$ (R — радиус шара).

Оценки емкости, выраженные через емкости уединенных проводников, и их тензор поляризуемости. При расчете тензора поляризуемости проводника V приходится в области вне проводника $\Omega - V$ находить распределение потенциала, принимающего на поверхности проводника значение

$$\varphi|_{\partial V} = E_0 r + u. \quad (12)$$

Постоянная u согласно [13] будет определяться формулой

$$u = -\frac{1}{C} p E_0,$$

где p — дипольный момент проводника относительно начала координат, возникающий при подаче на проводник потенциала, равного единице; C — емкость проводника.

Вводя обозначение

$$R = p/C,$$

формулу (12) можно переписать в виде

$$\varphi|_{\partial V} = E_0 (r - R) = E_0 r', \quad (13)$$

где r' — радиус-вектор в системе координат, сдвинутой от первоначальной на вектор R . Очевидно, что положение точки относительно проводника будет неизменным, поэтому назовем эту точку центром емкостного распределения заряда проводника.

Пусть имеются две проводящие оболочки, замкнутые, одна из оболочек целиком содержится внутри другой (рис. 3). Отмеченные на рисунке точки O_1 и O_2 соответствуют центрам емкостных распределений зарядов внешней и внутренней оболочек. Чтобы оценить с помощью принципа Гаусса емкость конденсатора, образованного оболочками, выберем в качестве пробных совокупности емкостных и поляризационных распределений зарядов на оболочках. Этим распределениям для внешней оболочки пусть отвечает полный заряд q и полный дипольный момент p_1 , а для внутренней — полный заряд $-q$ и полный дипольный момент p_2 .

Согласно принципу Гаусса полная электростатическая энергия таких распределений зарядов будет оцениваться сверху величиной $q^2/2C$, где C — емкость конденсатора. Эта энергия будет суммой собственных энергий первой W_1 и второй W_2 оболочек, а также энергии взаимодействия зарядов оболочек

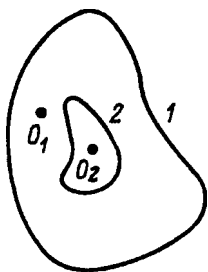


Рис. 3

$W_{вз}$. Для собственных энергий зарядов оболочек будут справедливы формулы:

$$W_1 = \frac{q^2}{2C_1} + \frac{1}{2} p_1 \hat{\alpha}_1^{-1} p_1; \quad W_2 = \frac{q^2}{2C_2} + \frac{1}{2} p_2 \hat{\alpha}_2^{-1} p_2,$$

где C_1 и C_2 — емкости оболочек; $\hat{\alpha}_1$ и $\hat{\alpha}_2$ — их тензоры поляризуемости.

Чтобы найти энергию взаимодействия зарядов оболочек, заметим, что потенциал, создаваемый

зарядами первой оболочки внутри нее, может быть представлен как

$$\varphi_1 = \frac{q}{C_1} + (r - R_1) \hat{\alpha}_1^{-1} p_1. \quad (14)$$

Такое представление следует из того, что емкостное распределение зарядов будет создавать постоянный потенциал внутри оболочки q/C_1 , а поляризационное согласно граничному условию (13) — линейное распределение потенциала, R_1 в (14) это радиус-вектор точки O_1 , а $\hat{\alpha}_1^{-1} p_1$ будет соответствовать однородному электрическому полю E_0 в граничном условии (13). Для энергии взаимодействия зарядов будем иметь

$$W_{вз} = \int_{\partial V_2} \sigma_2 \varphi_1 ds = -\frac{q^2}{C_1} + (R_1 - R_2) \hat{\alpha}_1^{-1} p_1 q + p_2 \hat{\alpha}_1^{-1} p_1.$$

Здесь R_2 — радиус-вектор точки O_2 . Вводя обозначения

$$C_{0i} = \frac{C_1 C_2}{C_1 - C_2}; \quad R_2 - R_1 = a$$

и суммируя собственные энергии зарядов оболочек с энергией взаимодействия этих зарядов, для полной электростатической энергии получим

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{1}{2} [p_1 \hat{\alpha}_1^{-1} p_1 + 2p_1 \hat{\alpha}_1^{-1} p_2 + p_2 \hat{\alpha}_2^{-1} p_2] - qa \hat{\alpha}_1^{-1} p_1.$$

Минимизируя W по p_1 и p_2 , найдем:

$$p_2 = -\hat{\alpha}_2 \hat{\alpha}_1^{-1} p_1; \quad p_1 = q [\hat{E} - \hat{\alpha}_2 \hat{\alpha}_1^{-1}]^{-1} a;$$

$$\min W = \frac{q^2}{2} \left[\frac{1}{C_{0i}} - a (\hat{\alpha}_1 - \hat{\alpha}_2)^{-1} a \right].$$

Здесь \hat{E} — единичная матрица. Соответствующей оценкой снизу для емкости конденсатора будет величина

$$C_{1i} = \frac{C_{0i}}{1 - C_{0i} a (\hat{\alpha}_1 - \hat{\alpha}_2)^{-1} a}. \quad (15)$$

Как уже упоминалось, оценивать емкость конденсатора величиной C_{0i} было предложено в статье [12]. Из соотношения (15) видно, что C_{1i} улучшает C_{0i} и в определенном смысле является следующим членом последовательности оценок снизу, выражаемых через электростатические характеристики уединенных оболочек. Для конденсатора, образованного двумя замкнутыми оболочками, представляет интерес построение монотонно возрастающей последовательности оценок истинного значения его емкости через электростатические характеристики уединенных оболочек и их геометрические параметры.

Последовательное уточнение оценок емкости путем представления пробных функций суммой мультиполей уединенных проводников. Формулу (8) можно рассматривать как оценку за номером «0», полученную путем учета лишь нулевых мультипольных моментов уединенных проводников. В оценке (15) учитываются уже дипольные распределения зарядов по поверхностям уединенных проводников. Разумеется, учитывая мультиполи высших порядков, можно улучшить оценку (15).

В качестве примера приведем здесь последовательность оценок для емкости конденсатора, образованного диском и сферой с совпадающими центрами:

$$\frac{C_i^{(0)}}{8\pi\epsilon_0 R} = \frac{\gamma}{\pi} \left[1 - 2 \frac{\gamma}{\pi} \right]^{-1}; \quad (16)$$

$$\frac{C_i^{(1)}}{8\pi\epsilon_0 R} = \frac{\gamma}{\pi} \left[1 - 2 \frac{\gamma}{\pi} - 2 \frac{\gamma^5}{\pi} \frac{5}{45 - 8 \frac{\gamma^5}{\pi}} \right]^{-1}; \quad (17)$$

$$\frac{C_i^{(2)}}{8\pi\epsilon_0 R} = \frac{\gamma}{\pi} \times \left[1 - 2 \frac{\gamma}{\pi} - 2 \frac{\gamma^5}{\pi} \frac{55125 + 19845\gamma^4 - 1288\frac{\gamma^9}{\pi}}{496125 - 88200\frac{\gamma^5}{\pi} - 70560\frac{\gamma^9}{\pi} + 1024\left(\frac{\gamma^7}{\pi}\right)^2} \right]^{-1}, \quad (18)$$

где $\gamma = \frac{a}{R}$; a — радиус диска; R — радиус шара.

Формула (16) эквивалентна формуле (15). В соотношении (17) учтены квадрупольные осесимметричные распределения зарядов по диску и сфере, а выражение (18) получено путем учета следующих после квадрупольных мультипольных моментов четного порядка. Оценки емкости такого конденсатора для нескольких отношений радиуса диска a к радиусу шара R представлены в табл. 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. — М.: Наука, 1974.
2. Бете Г. Квантовая механика. — М.: Мир, 1965.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. — М.: Наука, 1988.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. — М.: Наука, 1967.
5. Казанцев В.П. Вариационные оценки в электростатике. Емкость плоского конденсатора. — Изв. вузов. Физика, 1984, № 8.
6. Куклин Е.И. Вариационные неравенства в электростатике проводников. Расчет емкости и тензора поляризуемости. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: МФТИ, 1989.

Таблица 2

Отношение радиуса диска к радиусу шара	Значения емкости конденсатора			
	Оценка по формулам			Оценка по десяти членам ряда в мультипольном разложении
	(16)	(17)	(18)	
0,10	0,339952	0,339952	0,339952	0,339952
0,20	0,364751	0,364761	0,364761	0,364761
0,30	0,393454	0,393538	0,393538	0,393538
0,40	0,427060	0,427475	0,427479	0,427479
0,50	0,466942	0,468464	0,468498	0,468500
0,60	0,515041	0,519687	0,519907	0,519923
0,70	0,574187	0,586894	0,588041	0,588208
0,80	0,648680	0,681478	0,686812	0,688350
0,90	0,745383	0,829300	0,853927	0,869207
0,91	0,756663	0,849010	0,877857	0,897406
0,93	0,780279	0,892332	0,932134	0,964700
0,95	0,805417	0,941826	0,997279	1,053229

Примечание. Все значения поделены на коэффициент $8\pi\epsilon_0 a$ (a — радиус диска).

7. Баранова В.К. Метод вариационных неравенств в задачах электростатики. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: Университет дружбы народов им. П. Лумумбы, 1991.

8. Золотов О.А., Казанцев В.П. Аналитическое решение задачи о поляризуемости кольцевого кругового отверстия в неограниченном плоском экране нулевой толщины, полученное вариационным методом. — Радиотехника и электроника, т. 36, вып. 8.

9. Золотов О.А., Казанцев В.П., Лысенко Е.А. Метод эквивалентных зарядов и вариационные методы в электростатике. — Изв. вузов. Электромеханика, 1991, № 7.

10. Поля Г., Сега Г. Изопериметрические неравенства в математической физике. — М.: Физматгиз, 1962.

11. Беллман Р. Введение в теорию матриц. — М.: Наука, 1969.

12. Русиц Ю.С. К оценке электрической емкости замкнутых оболочек. — Электричество, 1982, № 4.

13. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. — М.: Мир, 1966.

[16.12.96]

Авторы: Казанцев Владимир Петрович окончил физический факультет Новосибирского государственного университета в 1970 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1980 г. в Институте физики им. Л.В. Киренского (Красноярск) по теме «Электрофизические свойства неоднородных материалов». Профессор кафедры общей физики Красноярского государственного университета (КрасГУ).

Лысенко Егор Анатольевич окончил физический факультет КрасГУ в 1989 г. Ассистент кафедры общей физики КрасГУ.

Расчет электрического поля высокочастотных сварочных установок для оценки облучаемости персонала

РУДАКОВ М.Л.

В статье продолжают предыдущие исследования облучаемости персонала промышленных высокочастотных установок для нагрева диэлектриков. Рассматривается облучение от конденсаторов больших размеров, используемых для сушки, предварительного подогрева и пр. Метод вторичных источников выбран в качестве расчетного. Показано, что процедура численного решения интегрального уравнения Фредгольма легко программируется, а решения при выбранных уровнях дискретизации относительно устойчивы. Приводятся и анализируются результаты расчета электрического поля на рабочих местах.

Ключевые слова: нагрев диэлектриков, метод вторичных источников, численное решение, устойчивость решения, напряженность электрического поля

Введение. В предыдущей работе, посвященной проблеме электромагнитной безопасности высокочастотных сварочных установок [1], было рассмотрено применение метода эквивалентных зарядов для расчета напряженности электрического поля в ближней зоне различных конструкций рабочих конденсаторов. Относительная простота расчетных моделей и малое время счета позволяют быстро оценивать параметры облучаемости на рабочих местах по известным технологическим параметрам сварочного процесса.

Еще одной группой электротермических установок, вызывающих повышенное облучение персонала, являются устройства с плоскими конденсаторами, имеющими значительные линейные размеры (до 1,7 м). Высокочастотные установки с подобными конденсаторами имеют широкое промышленное применение [2, 3], например в процессах:

сушки бумаги, текстиля, древесины, литейных стержней и пр.;

предварительного подогрева перед прессованием древесных пластиков;

ускоренного отверждения связующего в процессе изготовления стеклопластиков; обработки пищевых продуктов (разморозка, тепловая обработка).

Практически все установки имеют конвейер, по которому перемещаются нагреваемые объекты; металлическая лента конвейера часто служит нижней (заземленной) обкладкой конденсатора. Верхние (высокопотенциальные) пластины, как правило, неподвижны. В комплект установок мо-

The paper continues previous studies of the problem of exposure to radiation of the personnel operating high-frequency units for heating dielectrics. The case is considered when the personnel is subjected to the action of large capacitors used for drying, preheating, etc. For calculation, a secondary sources method is used. It is shown that the procedure of numerical solution of the Fredholm integral equation can be easily programmed and the solutions are relatively stable for chosen levels of digitalization. Results of an analysis of the electric field at work places are given and discussed.

Key words: dielectrics, heating, secondary sources method, numerical solution, stability, electric field strength

жет входить несколько высокочастотных генераторов, размещенных в отдельных экранированных шкафах. Конвейеры установок как отечественного, так и зарубежного производства выполняются экранированными по длине с обеих сторон, возможность нежелательного облучения персонала возникает от крайних конденсаторов в зонах открытых окон загрузки и выгрузки конвейера. Наряду с высокой мощностью установок на облучаемость негативно влияют дополнительные факторы:

вертикальное размещение пластин рабочего конденсатора и, соответственно, наличие сильной вертикальной компоненты напряженности электрического поля, что наиболее неблагоприятно в смысле поглощения электромагнитной энергии стоящим оператором (горизонтальное размещение пластин встречается крайне редко, например, в установках для изготовления конвертов [3]);

установки работают в непрерывном режиме, который обуславливает значительное время облучения персонала за рабочую смену.

В статье приводятся рекомендации по построению практических расчетных алгоритмов для оценки облучаемости персонала, находящегося в ближней зоне рабочих конденсаторов больших линейных размеров.

Выбор методов расчета. Общий алгоритм расчета облучаемости персонала для высокочастотных установок может быть разбит на несколько последовательных этапов;

1. Тепловой расчет. На этой стадии по заданным электрофизическим свойствам матери-

алов и геометрическим параметрам конденсаторов определяются необходимые мощность, сообщаемая нагреваемым материалам, и время нагрева.

2. Электрический расчет. Определяются напряженности поля в материале и воздушном зазоре конденсатора, рассчитываются разность потенциалов пластин, сопротивление нагреваемого тела и ток в цепи.

3. Расчет напряженности поля на рабочих местах. По известным значениям тока, потенциала верхней пластины и геометрии источника рассчитываются компоненты поля вблизи технологических конструкций.

В рамках данной статьи потенциал пластины будет полагаться известным, методики теплового и электрического расчета достаточно подробно рассмотрены в [2, 4]. Дальнейшие рассуждения будут касаться только электрической компоненты E в квазистатическом приближении, поскольку, как показывает практика, напряженность магнитного поля H на рабочих местах установок для нагрева диэлектриков достаточно мала. Расчет H в ближней зоне шин токопроводов, имеющих простую геометрическую форму, может быть произведен по известным аналитическим соотношениям.

Расчет E может вестись как аналитическими, так и численными методами. Среди последних ведущее место в зарубежных публикациях на эту тему занимают конечно-разностные методы (отметим работу [5] для плоских конденсаторных конструкций), в то время как метод вторичных источников, эффективный для решения ряда электротехнических задач [6, 7], остается практически неиспользованным для анализа облучаемости в высокочастотной электротермии. Выделим некоторые особенности расчетов электрических полей на рабочих местах установок диэлектрического нагрева, которые подчеркивают целесообразность применения метода вторичных источников:

рабочие места расположены во внешней открытой области ближней зоны излучателей;

интерес представляет напряженность поля на некотором расстоянии от конденсаторов, причем рабочая зона имеет относительно небольшие размеры;

при численном решении интегральных уравнений система линейных алгебраических уравнений имеет малую размерность, достаточную для расчета поля с требуемой точностью.

Кроме того, расчеты по методу вторичных источников для решения задач электромагнитной безопасности могут производиться на ПЭВМ с низкой производительностью, причем подготовка данных требует небольшого времени.

Конструкция рабочего конденсатора и расчетные формулы. На рис. 1 приведена конструкция рабочего конденсатора с высокопотенциальным электродом, образующим зазор z_0 с плоскостью плиты конвейера. Электрический заряд распределяется по обеим сторонам подобной незамкнутой поверхности, и при использовании метода вторичных источников необходимо заменить поверхность двумя простыми слоями зарядов. Однако в силу малой толщины поверхности слои будут близко прилегать друг к другу, что приведет к снижению точности и увеличению времени счета. Более просто можно рассчитать поле на некотором расстоянии от проводника, вводя один слой зарядов с плотностью, равной суммарной [8]. Запишем интегральное уравнение Фредгольма первого рода для суммарной поверхностной плотности зарядов [7]:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma(M)}{r_{QM}} dS_M, \quad (1)$$

где U_0 — потенциал пластины; S — поверхность пластины; r_{QM} — расстояние между точкой Q , в которой определяется потенциал, и переменной точкой интегрирования M ; ϵ_0 — электрическая постоянная.

Ядро уравнения имеет следующий вид:

$$\frac{1}{r_{QM}} = \frac{1}{\sqrt{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2 + 4z_0^2}}. \quad (2)$$

Нетрудно убедиться, что ядро представляет собой функцию Грина для верхнего полупространства, причем первый член разности (2) связан с распределением заряда на поверхности уединенного заряженного тела, а второй — с влиянием идеально проводящей плоскости нулевого потенциала.

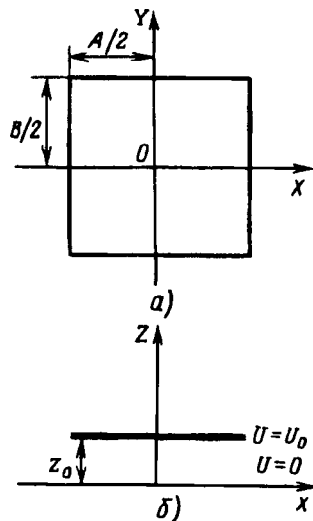


Рис. 1. Геометрия рабочего конденсатора

Численное решение (1) путем сведения к системе линейных алгебраических уравнений проводилось по методу площадок [9]. Проведем разбиение поверхности S на N прямоугольных площадок S_j ($j=1, \dots, N$), полагая в каждой из них поверхностную плотность заряда постоянной. В дальнейшем примем следующие обозначения: N_x, N_y — соответственно число разбиений S по координатам X и Y ; hx, hy — разбиения; $xlow_j, xhigh_j$ — нижняя и верхняя границы площадки S_j по оси X ; $ylo\!w_j, yhigh_j$ — нижняя и верхняя границы площадки S_j по оси Y .

Заменяя интеграл по всей площади S в выражении (1) суммой интегралов по площадкам S_j , получаем линейную алгебраическую систему:

$$\sum_{j=1}^N M_{ij} \sigma_j = 4\pi\epsilon_0 U_{0i}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где σ_i ($i=1, \dots, N$) — искомые значения плотности заряда; M_{ij} — квадратная матрица коэффициентов размером $N \times N$:

$$M_{ij} = M1_{ij} - M2_{ij}; \quad (4)$$

$M1_{ij}$ и $M2_{ij}$ определяются по следующим выражениям:

$$M1_{ij} = \int_{S_j} \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} dS_j;$$

$$M2_{ij} = \int_{S_j} \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + 4z_0^2}} dS_j;$$

Ядро $M1$ с особенностью интегрируемо [9], ниже приводится аналитическое выражение для элементов матрицы $M1_{ij}$, полученное с использованием системы DERIVE:

$$M1_{ij} = t1_{ij} \ln \left(\frac{T1_{ij} - H_{ij}}{T3_{ij} - L_{ij}} \right) - t2_{ij} \ln \left(\frac{T2_{ij} - H_{ij}}{T4_{ij} - L_{ij}} \right) +$$

$$+ L_{ij} \ln \left(\frac{T3_{ij} + t1_{ij}}{T4_{ij} + t2_{ij}} \right) - H_{ij} \ln \left(\frac{T1_{ij} + t1_{ij}}{T2_{ij} + t2_{ij}} \right). \quad (5)$$

В выражении (5) обозначено:

$$t1_{ij} = y_i - ylow_j; \quad t2_{ij} = y_i - yhigh_j; \quad H_{ij} = x_i - xhigh_j;$$

$$L_{ij} = x_i - xlow_j; \quad T1_{ij} = \sqrt{H_{ij}^2 + t1_{ij}^2};$$

$$T2_{ij} = \sqrt{H_{ij}^2 + t2_{ij}^2}; \quad T3_{ij} = \sqrt{L_{ij}^2 + t1_{ij}^2}; \quad T4_{ij} = \sqrt{L_{ij}^2 + t2_{ij}^2},$$

где x_i, y_i — координаты средней точки площадки S_i .

При выполнении расчетов принималось во внимание следующее: одинаковые форма и размер площадок разбиения и симметрия распределения заряда относительно осей X и Y (рис. 1). Математически это выражается в одинаковых ди-

агональных элементах матрицы $M1$ и симметрии остальных элементов относительно главной диагонали. Таким образом, при заполнении матрицы $M1$ достаточно вычислить не N^2 , а $(N^2 - N)/2 + 1$ элемент, причем выражение для диагональных элементов имеет простой вид:

$$M1_{ij} = hy \cdot \ln \left(\frac{H_{xy} + hx}{H_{xy} - hx} \right) + hx \cdot \ln \left(\frac{H_{xy} + hy}{H_{xy} - hy} \right), \quad (6)$$

где

$$H_{xy} = (hx^2 + hy^2)^{1/2}.$$

При вычислении матрицы $M2$ был использован тот факт, что зазор между пластинами рабочего конденсатора превышает размеры площадок разбиения. Это позволило не приводить громоздкие аналитические выражения и вычислять $M2_{ij}$ следующим образом:

$$M2_{ij} = \begin{cases} \frac{hx \cdot hy}{2z_0}, & i = j \\ \frac{hx \cdot hy}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + 4z_0^2}}, & i \neq j. \end{cases} \quad (7)$$

После нахождения матрицы M_{ij} значения поверхностной плотности заряда находились по (3).

Результаты расчетов и оценка устойчивости решений. Все вычисления выполнялись с точностью до 10 знаков после запятой (для снижения погрешностей, связанных с округлением чисел в ПЭВМ). Устойчивость решений оценивалась по числу обусловленности COND матрицы M_{ij} .

При нагреве в больших конденсаторах не удается определить потенциал пластины с погрешностью, меньшей 20%. Причинами этого являются как погрешности множителей, входящих в формулу для U_0 (частота генератора установки, относительная диэлектрическая проницаемость), так и сложный характер распределения поля в нагреваемом материале и воздушном зазоре, сильно отличающийся от идеальной картины, принимаемой при расчете потенциала. Последнее весьма характерно для больших зазоров между обкладками конденсатора. В силу этих причин не удастся получить малую погрешность решения даже при хорошо обусловленных матрицах. Поэтому регуляризация уравнения (1), существенно усложняя исходное уравнение, не дает значительного выигрыша в точности.

После определения поверхностной плотности заряда находились потенциал и напряженность электрического поля в любой точке внешнего пространства.

Необходимое число участков разбиения можно оценивать разными способами, в том числе и

по точности расчета потенциала пластины конденсатора в контрольных точках. Однако в рамках данной задачи упрощает оценку тот факт, что интерес представляет не потенциал и распределение напряженности по поверхности пластин, а напряженность на некотором расстоянии от них, т.е. в рабочей зоне. Дополнительным условием, снижающим требование к точности решений, является погрешность измерительных приборов (20–30%), рекомендованных [10] для гигиенического контроля.

В силу этого требование к разбиению исходной поверхности формулировалось следующим образом: количество и форма элементарных площадок должны быть таковы, чтобы решение уравнения для плотности заряда было устойчиво и на минимально возможном расстоянии от конденсатора была бы достигнута необходимая точность расчета поля. Чтобы обеспечить выполнение данного требования, была реализована следующая вычислительная процедура, основанная на правиле Рунге:

1. Задавались минимальное расстояние нахождения оператора (40 см от края пластины) и исходное разбиение на $N=4$ площадки ($N_x=N_y=2$).

2. Рассчитывалось $COND(N)$ для матрицы M и определялась напряженность поля E на заданном минимальном расстоянии.

3. Увеличивалось на единицу число N_x или N_y и повторялись процедуры по пунктам 1 и 2.

4. Расчет прекращался, когда новые значения E отличались от предыдущих менее чем на 1%.

Последовательность решений уравнения (3) в силу хорошей обусловленности матриц достаточно быстро сходится, и необходимое число площадок оценивалось как $N=24$. На рис. 2 представлена половина пластины, разбитой на 24 площадки. Ниже приведены соответствующие значения поверхностной плотности заряда в срединных точках шести участков разбиения, отнесенные к минимальным элементам массива σ :

Номер точки	1	2	5	6	9	10
σ/σ_{\min}	2,41	1,76	1,68	1,03	1,64	1,0

Число обусловленности при выбранном N не превосходило семи, что позволяет говорить об

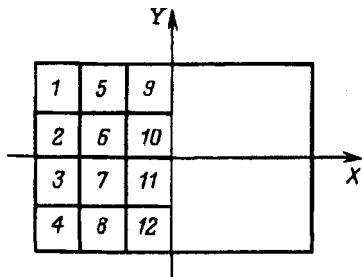


Рис. 2. Нумерация площадок пластины при $N=24$

относительно устойчивых решениях. Помимо общего числа расчетных точек на число обусловленности влияют следующие моменты:

1. При одинаковом числе N устойчивость существенно улучшается, если форма площадок близка к квадратной. Таким образом, размеры площадок не должны выбираться произвольно, более того, можно рекомендовать увеличить N , если при этом достигается «квадратное» разбиение. Выигрыш в устойчивости проявляется в уменьшении числа обусловленности.

2. Размер зазора между пластинами. Число обусловленности слабо росло с увеличением зазора, однако при выбранном уровне дискретизации для реальных размеров рабочих конденсаторов оно не превышало десяти.

На рис. 3 представлены зависимости $E=f(X)$ при $Y=\text{const}$, $Z=0$; $z_0=0,4$ м; $A=1,35$ м; $B=1$ м; $N=24$. Потенциал верхней пластины вычислялся по заданным параметрам процесса сушки и составлял 1,2 кВ. Отметим выраженный максимум зависимостей, особенно характерный для малых расстояний Y .

На рис. 4 представлены зависимости $E=f(Y)$ при $X=\text{const}$. Кривая 1 соответствует плоскости $X=0$, кривая 2 — $X=0,5A$ (край конденсатора). Также на рис. 4 приведены два предельно допустимых уровня электрического поля для частотного диапазона 3–30 МГц, рассчитанных исходя из допустимой энергетической нагрузки за рабочий день [10]. Уровень $E=300$ В/м соответствует длительности облучения 0,08 ч и менее, $E=30$ В/м — непрерывному облучению за восьмичасовой рабочий день.

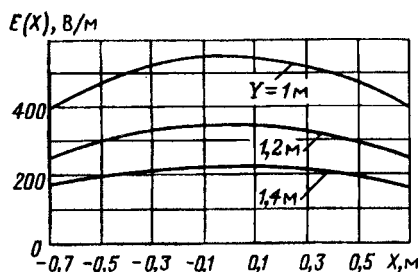


Рис. 3. Зависимость напряженности электрического поля от координаты X ($A=1,35$ м; $B=1$ м) при $z_0=0,4$ м; $Z=0$; $N=24$

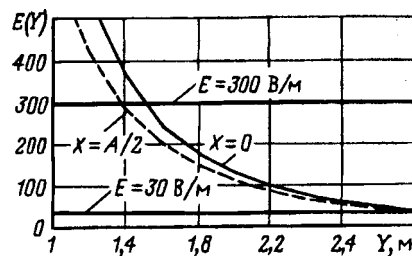


Рис. 4. Зависимость напряженности электрического поля от координаты Y ($A=1,35$ м; $B=1$ м) при $z_0=0,4$ м; $Z=0$; $N=24$

Выводы. 1. Метод вторичных источников позволяет эффективно рассчитывать напряженность электрического поля на рабочих местах высокочастотных установок.

2. Наиболее «опасной» по облучению является плоскость $X=0$.

3. Поскольку из технологических соображений невозможно экранировать окна загрузки и выгрузки при непрерывной работе конвейера установки, можно рекомендовать два основных защитных мероприятия для персонала:

положение персонала «с боков» столов загрузки и выгрузки является более предпочтительным по соображениям безопасности, особенно для малых расстояний от окон конвейера;

ограничение времени пребывания в электрическом поле. Допустимое время облучения за смену определяется по [10] исходя из предельно допустимого значения энергетической нагрузки за смену и фактической напряженности электрического поля на рабочем месте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорова И.Г., Рудаков М.Л. Анализ распределения напряженности электрического поля на рабочих местах операторов высокочастотных сварочных установок. — Электричество, 1996, № 6.
2. Глуханов Н.П., Федорова И.Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1972.
3. Jones P.L. Radio Frequency Processing in Europe. — J. of Microwave Power, 1987, № 3.

4. Княжевская Г.С., Фирсова М.Г., Килькеев Р.Ш. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов. — Л.: Машиностроение, 1989.

5. Chen J.Y., Gandhi O.P. Electromagnetic Deposition in an Anatomically Based Model of Man for Leakage Fields of a Parallel-Plate Dielectric Heater. — IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1989, vol. 37, № 1.

6. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. — М.: Энергия, 1975.

7. Тозони О.В., Майергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. — Киев: Техніка, 1974.

8. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

9. Иосель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергия, 1969.

10. Санитарные правила и нормы № 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. — М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996.

[02.07.97]

Автор: Рудаков Марат Леонидович в 1991 г. окончил факультет корабельной электротехники и автоматики Ленинградского электротехнического института, где в 1995 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и расчет параметров электромагнитных излучений высокочастотных установок для нагрева диэлектриков». Доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология» Балтийского государственного технического университета.

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов стран СНГ и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира на русском и английском языках. Реклама в черно-белом изображении может быть помещена на страницах журнала или на его обложке. Напоминаем наш адрес: 103012 Москва, К—12, Б. Черкасский пер., 2/10 или 101000 Москва, Главпочтамт, абонементам ящик № 648. Телефоны для справок: 924-24-80, 928-88-69.

Переносной цифровой измеритель больших постоянных токов

ЗЫКИН Ф.А., КАЗАКОВ М.К.

Описывается переносное устройство для измерения больших постоянных токов, выполненное на основе пояса Роговского, в котором все функциональные операции выполняются на базе цифровой техники. Приведен результат анализа, который показал, что аналогичные устройства могут быть выполнены с классом точности 0,05 и выше. Это позволяет их использовать в качестве образцовых метрологических устройств и для поверки стационарных систем без их демонтажа.

Ключевые слова: измерение тока, большие постоянные токи, погрешности измерения, переносные измерители

Измерение больших постоянных токов (БПТ) (до 300 кА) без разрыва цепи с большой точностью является актуальной проблемой. Такие токи используются в установках металлургической и химической промышленности, в частности, в системах питания электролизеров на алюминиевых заводах. По технологическим требованиям подобные измерения должны производиться с погрешностями, не превышающими 0,5%.

Для преобразования БПТ в измерительный сигнал используются измерительные преобразователи токов (ИПТ). В настоящее время такие преобразователи выпускаются фирмами «Siemens» (Германия), «Halmar Electronics Corp.» (США). В нашей стране по разработкам авторов ИПТ изготовлены АО «Высокоточная аппаратура» (г. Ульяновск) и поставлены в эксплуатацию на Волгоградском и Каменск-Уральском алюминиевых заводах. Однако в эксплуатации не обеспечена поверка этих измерительных приборов. Во-первых, такие установки используются в непрерывном технологическом цикле и их демонтаж на длительное время недопустим, к тому же сами установки часто являются довольно громоздкими. Во-вторых, на заводах, как правило, отсутствуют метрологические лаборатории для поверки таких устройств.

В России поверку таких устройств можно провести в Екатеринбургском филиале ВНИИМС и в метрологической лаборатории при Братском алюминиевом заводе. Поэтому актуально создание таких переносных измерительных устройств БПТ, которые могли бы служить в качестве образцовых при поверке стационарных установок на рабочем месте.

Авторами разработано переносное устройство для измерения БПТ, описанное в [1, 2], созданное

A portable device for measuring great direct current is described constructed on the basis of a Rogovsky belt. All functional operations are executed on the basis of a digital equipment. Results of an analysis are given which have shown that such devices can be constructed with the accuracy class 0,05 and higher. That makes it possible to use them as standard model metrology devices for calibrating stationary systems without dismantling.

Key words: measurement of current, great direct currents, error of measurement, portable devices

на базе магнитного пояса Роговского на разъемном неферромагнитном каркасе и аналогового электронного интегратора. Модернизировав пояс Роговского и электронную часть такого преобразователя, АО «Высокоточная аппаратура» на базе разработок авторов изготовила переносное устройство, погрешность которого, как показали испытания в Екатеринбургском ВНИИМС, не превысила 0,07%. Однако в связи с тем, что в структуру устройства входят узлы на базе аналоговой техники, в частности интегратор, стабильность характеристик которых вызывает сомнение, данное устройство не может претендовать на высокий класс точности. С целью улучшения метрологических характеристик авторы доработали переносное цифровое измерительное устройство. Принцип работы его вытекает из следующего.

При полном охвате системы шин с током I поясом Роговского по контуру l (рис. 1) на элементарном участке dl потокосцепление $d\Psi$ обмотки пояса Роговского определится уравнением

$$d\Psi = \mu_0 HSW' \cos \alpha dl,$$

где W' — линейная плотность намотки витков

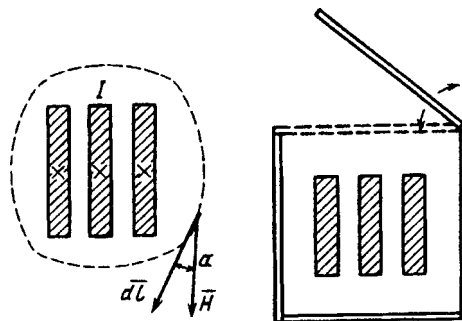


Рис. 1. Конструктивное исполнение пояса Роговского

пояса (число витков на единицу длины); l — осевая линия пояса Роговского, принимаемая за контур интегрирования; S — площадь сечения пояса Роговского; α — угол между направлениями векторов напряженности магнитного поля \vec{H} и $d\vec{l}$; μ_0 — магнитная постоянная.

Полное потокоцепление по всей длине определяется выражением

$$\Psi = \mu_0 S W' \oint_l H \cos \alpha dl = \mu_0 S W' I, \tag{1}$$

где по закону полного тока $I = \oint H \cos \alpha dl$.

При полном охвате токоведущих шин поясом Роговского (рис. 1) взаимная индуктивность между первичной цепью и обмоткой пояса M_{\max} принимает максимальное значение, которое согласно выражению (1) равно

$$M_{\max} = \frac{\Psi}{I} = \mu_0 S W'. \tag{2}$$

Из (2) следует, что взаимная индуктивность зависит только от площади сечения S пояса Роговского и плотности намотки витков W' . Отметим, что данное заключение строго выполняется только лишь в том случае, когда площади витков обмотки пояса по всей длине одинаковы и их размеры малы по сравнению с размерами токоведущих шин и контура, чтобы при этом можно было бы считать магнитный поток по площади витка распределенным равномерно.

Если пояс Роговского в замкнутом состоянии подносится к объекту измерения (к шинам с током I), то в начальном состоянии взаимная индуктивность $M_{\text{нач}}$ равна нулю и по мере охвата увеличивается до M_{\max} . При этом в обмотке пояса наводится ЭДС:

$$e = -I \frac{dM}{dt} = -u. \tag{3}$$

Следовательно, напряжение u на обмотке пояса, равное по величине ЭДС, содержит информацию об измеряемом токе I .

Используя (3) при полном охвате шин за время t_1 , получаем выражение для тока:

$$I = \frac{1}{M_{\max}} \int_0^{t_1} u dt \approx \frac{T_2}{M_{\max}} \sum_{q=1}^N u_q, \tag{4}$$

где T_2 — интервал, на который разбивается время t_1 , а $N = t_1/T_2$.

Последнее выражение и принимается в качестве математической модели для построения цифрового измерителя тока.

Упрощенная структурная схема устройства приведена на рис. 2. Эта схема включает: пояс Роговского 1, масштабный усилитель 2, времяимпульсный преобразователь 3, генератор пи-

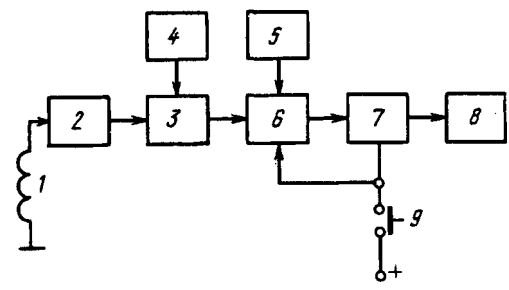


Рис. 2. Структурная схема электронной части измерителя БПТ

лообразных импульсов 4, генератор опорной частоты 5, электронный ключ 6, сумматор (счетчик) 7, дешифратор с индуктором 8, кнопку пуска 9.

В полной рабочей схеме должно быть предусмотрено использование реверсивного счетчика, позволяющего производить как суммирование, так и вычитание импульсов, поскольку входное напряжение может иметь разные знаки, что зависит от действий операторов.

Порядок работы устройства следующий. Перед началом измерения пояс Роговского 1 находится в замкнутом состоянии около объекта измерения. Нажатием кнопки 9 оператор сбрасывает возможную начальную информацию, накопленную в сумматоре 7, запускает электронную часть устройства и охватывает поясом Роговского систему токоведущих шин. Индуцированное напряжение в обмотке пояса, усиленное масштабным усилителем 2, подается на вход времяимпульсного преобразователя 3. В этом блоке полученный сигнал в виде напряжения $u'(t)$ сравнивается с пилообразным напряжением генератора 4, преобразуя значение сигнала в q -м такте u'_q в пропорциональный интервал времени τ_q (рис. 3). Из рис. 3, а) вытекает, что

$$\tau_q = \frac{T_2}{U_0} u'_q. \tag{5}$$

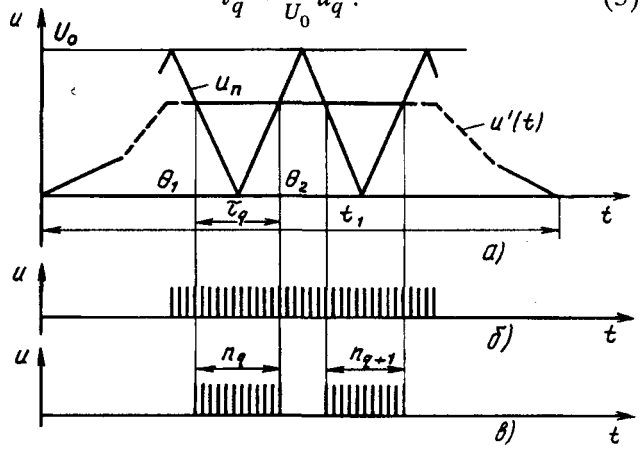


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений: а — напряжение выхода масштабного усилителя и выхода генератора пилообразного напряжения; б — высокочастотные импульсы опорной частоты; в — импульсы, поступающие на вход сумматора

Интервал времени τ_q в q -й такт может быть определен по функции $u'(t)$ решением системы уравнений

$$u'[(q-1)T_2 + \theta_{1q}] = U_0 - \frac{2U_0}{T_2}\theta_{1q}; \quad (6)$$

$$u'[(q-1)T_2 + 0,5T_2 + \theta_{2q}] = \frac{2U_0}{T_2}\theta_{2q}; \quad (7)$$

$$\tau_q = 0,5T_2 + \theta_{2q} - \theta_{1q}. \quad (8)$$

Правые части уравнений (6) и (7) представляют линейные зависимости восходящей и нисходящей частей пилообразного напряжения, а θ_{1q} и $0,5T_2 + \theta_{2q}$ — значения времени, отсчитываемые от начала q -го такта до моментов, когда напряжение u' достигнет нисходящей и восходящей частей пилообразного напряжения соответственно (рис. 3, а).

В течение интервалов времени τ_q , определяемых условием $u'(t) > u_n$, где u_n — пилообразное напряжение генератора 4, открывается ключ 6 и импульсы высокочастотного генератора 5 подаются на сумматор 7.

Число импульсов за время τ_q

$$n_q = \tau_q f_1, \quad (9)$$

где f_1 — опорная частота высокочастотных сигналов генератора 5.

Учитывая (4) и (5), получаем выражение для измеряемого тока:

$$I = \frac{U_0}{M_{\max} k f_1} \sum_{q=1}^N n_q = K n, \quad (10)$$

где $n = \sum_{q=1}^N n_q$ — число импульсов, поступивших на вход счетчика за время интегрирования t_1 ; $K = U_0 / (M_{\max} k f_1)$.

Из выражений (10) и (9) вытекает, что результат измерения не зависит от тактовой частоты. Это объясняется тем, что при уменьшении (увеличении) тактовой частоты интервал τ_q во всех тактах на протяжении всего времени измерения t_1 увеличивается (уменьшается), число тактов N уменьшается (увеличивается) и в итоге число импульсов n остается неизменным.

Надо ожидать влияния на результаты измерения погрешностей электронного устройства, зависящих от дискретности измерения, частоты сигналов генератора опорной частоты, а также от коэффициента амплитуды K_A , равного

$$K_A = U_0 / U_m, \quad (11)$$

где U_m — максимальное значение напряжения на выходе масштабного усилителя.

Для решения поставленных вопросов процесс измерения, описываемый уравнениями (6)–(10), моделировался на ЭВМ: по существу, указанные уравнения определяют алгоритм работы устройства.

Поскольку форма напряжения $u'(t)$, входящего в уравнения (6), (7), зависит от действия оператора и строго не может быть выражена аналитической функцией, то можно задаться произвольной функцией, предполагая малую зависимость погрешности устройства от формы $u'(t)$.

Пусть напряжение на входе времяимпульсного преобразователя $u'(t)$ определяется первым полу- периодом синусоидальной функции, период которой равен $2t_1$, где t_1 — время измерения. Тогда уравнения (6), (7) и (8) могут быть представлены так:

$$\sin \left[\frac{\pi}{t_1} ((q-1)T_2 + T_1 a) \right] = K_A - 2K_A T_1 \frac{n}{T_2}; \quad (12)$$

$$\sin \left[\frac{\pi}{t_1} ((q-1)T_2 + 0,5T_2 + T_1 b) \right] = 2K_A T_1 \frac{m}{T_2}; \quad (13)$$

$$\tau_q = T_1 (m-n) + 0,5T_2, \quad n_q = \tau_q f_1; \quad (14)$$

$$n = \sum_{q=1}^N n_q, \quad (15)$$

где a — число импульсов от начала q -го тока до момента равенства интегрируемого сигнала с нисходящим фронтом пилообразного напряжения; b — число импульсов от середины q -го такта до момента равенства интегрируемого сигнала с восходящим фронтом пилообразного напряжения.

Для определения методической погрешности цифрового интегратора сравним результаты, полученные из уравнений (12)–(15), с результатами аналитического интегрирования, полученного из уравнения

$$\int_0^{t_1} U_{\max} \sin \left(\frac{\pi}{t_1} t \right) dt = \frac{2}{\pi} U_{\max} t_1.$$

Приведем значение последующего интеграла к числу импульсов n_0 , которое с учетом (5) равно

$$n_0 = \frac{2t_1 f_1}{\pi K_A}.$$

Тогда относительная методическая погрешность определится выражением

$$\delta = \frac{n-n_0}{n_0} 100\%,$$

Исследование функции $u'(t)$ в форме одного полупериода синусоиды с амплитудой U_m и моделирование работы цифрового блока на компьютере позволило оценить метрологические характеристики устройства и их зависимость от подбора некоторых параметров.

Исследования были проведены с целью оценки методической погрешности цифрового блока и выбора наиболее благоприятных режимов его работы. В частности, представляют интерес вопросы влияний на погрешности времени t_1 , частоты f_1 , тактовой частоты f_2 , коэффициента амплитуды K_A .

Основные выводы проведенных исследований сводятся к следующему.

На точность измерения влияет коэффициент амплитуды K_A . При экспериментировании K_A изменялся от единицы до двух. Результат не был неожиданным: при приближении значения K_A к единице точность повышается. Это объясняется тем, что при $K_A=1$ увеличивается интервал времени τ , в течение которого измеряется ток при одном и том же значении периода пилообразного напряжения. Это приводит к тому, что влияние дискретности измерения уменьшается и точность увеличивается.

Эксперимент показал, что относительная методическая погрешность устройства не изменится, если время измерения t_1 , периоды высокочастотных сигналов T_1 и тактовых сигналов T_2 соответственно увеличить или уменьшить в одинаковое число раз.

Точность измерения зависит от коэффициентов $K_1=T_2/T_1$ и $K_2=t_1/T_2$, причем, чем больше эти коэффициенты, тем меньше относительные методические погрешности, вызванные дискретностью измерения. Коэффициент K_1 определяет

число импульсов генератора опорной частоты за период тактового пилообразного напряжения (тактовых импульсов), а K_2 — число колебаний тактовых импульсов за период измерения. Моделирование на компьютере показало, что если $K_1 \geq 100$ и $K_2 \geq 100$, то относительная погрешность не превышает сотые доли процента, а при увеличении K_1 погрешности составляют тысячные доли процента.

Исследования показали перспективность внедрения переносных цифровых устройств, созданных на базе пояса Роговского, в качестве метрологической установки для поверки стационарных измерителей больших постоянных токов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зыкин Ф.А. Устройство для измерения магнитных потоков, намагничивающих сил и токов. — Электричество, 1995, № 1.
2. Пат. № 2006043 (RU). Переносной измеритель токов / Ф.А. Зыкин, М.К. Казаков, Т.С. Чистякова, А.И. Дивеев. — Оpubл. в БИ, 1994, № 1.

[26.03.98]

А в т о р ы: Зыкин Федор Андреевич окончил в 1949 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. В 1990 г. в Московском энергетическом институте (МЭИ) защитил докторскую диссертацию по теме «Новые методы измерения мощности и энергии в энергетических системах с искажающими нагрузками». Профессор Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ).

Казаков Михаил Константинович окончил энергетический факультет Ульяновского политехнического института в 1981 г. В 1991 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию по теме «Измерительные преобразователи высоких напряжений». Доцент УлГТУ.

Два открытия, сделанные в Петербурге

Нельзя сказать, что трудам петербургского академика Ф.У.Т.Эпинуса (1724—1802) уделялось мало внимания мировым научным сообществом. Первооткрыватель пирозлектричества, автор «Теории электричества и магнетизма», создатель первого ахроматического микроскопа неоднократно упоминался и цитировался в работах великих физиков. А.Вольта, Л.Эйлера, Б.Франклина, М.В. Ломоносова и М.Фарадея [1—3]. Но так получилось, что в стороне от внимания историков науки остались работы Эпинуса, оказавшие значительное влияние на развитие электротехники — науки, которая занимается изучением применения знаний об электричестве в деятельности человека.

Напомним две из многочисленных работ Эпинуса, оказавшие влияние на создание новых электрических конструкций и приборов и приведшие к принципиально новым решениям. Первая относится к получению новых возможностей от электрических (электростатических) машин, вторая — к созданию конденсатора переменной емкости. Отметим, что роль Эпинуса в создании конденсатора с воздушным диэлектриком и электрофорного источника электричества в истории науки достаточно освещена [4—5].

Свойство натертого янтаря притягивать легкие предметы известно давно. Наука об электричестве, возникшая в 1600 г., к моменту, когда Эпинус начал электрические опыты, насчитывала в своей биографии около полутора столетий, но, как это не покажется странным, никто из исследователей за это время не обратил внимания на, казалось бы, элементарный факт: при электризации трением электризуются как натираемое, так и натирающее тело. Любопытно, что открытие этого явления произошло при проверке одной из теорий электричества, предложенной Б.Франклином, так называемой унитарной теории. Оказалось, что, пользуясь этой теорией, можно заранее предсказать результаты опытов.

Проводя опыты над пирозлектрическими свойствами турмалина, Эпинус обратил внимание на тот факт, «что путем нагревания одна сторона турмалина становится положительно электрической, а другая — отрицательно электрической». Он «был немало удивлен этим открытием». «Однако, — рассуждал далее он, — если бы я немного внимательнее рассматривал выводы теории Фран-

клина, я не был бы поражен событием, кое легко мне было предвидеть» [6].

Рассуждения привели Эпинуса к выводу: «... едва возникает электричество положительное, как отрицательное возникает одновременно с ним, и одно не может быть получено без другого. Я тщательно исследовал, подтверждает ли эксперимент — этот единственный в физике компетентный судья — данный принцип, и нашел, что в этом пункте, как и во всех других, он согласуется с выводами теории Франклина».

Опыты, проводимые Эпинусом, были просты. Он взял две квадратные пластинки стекла, приклеил к ним с торца ручки и потер ими одна о другую. В результате «стекла стали оба электрическими, но различно, одно положительно, а другое отрицательно электрическим».

Затем экспериментатор взял пластинки других веществ: тер стекло о серу, воск, металлы — явления всегда были одинаковыми. В результате Эпинусом был сделан однозначный вывод: «Я проделал большое количество опытов подобного рода, которые позволяют мне установить в качестве аксиомы: если электричество создано трением, оба электрических свойства возникают всегда одновременно, и из двух натертых тел неизбежно одно становится положительно, а другое отрицательно электрическим».

Несправедливо, что историки науки этот важнейший установленный факт иногда приписывают ученику Ф.У.Т.Эпинуса И.К. Вильке (1732—1796), который, развивая опыты учителя, составил так называемый трибоэлектрический ряд веществ, каждый член которого при трении его о следующее за ним вещество наэлектризовывается положительно [7, с. 33]. Впрочем, в своей работе «О противоположных электричествах» [8], где Вильке опубликовал этот ряд, есть записи о том, что Эпинус помогал ему своими советами.

Для создателей электрических генераторов трения открытие Эпинуса сыграло важную роль. При необходимости получения от машины положительного или отрицательного заряда теперь не надо было создавать смоляной или стеклянный шар. Достаточно было заземлить либо натирающую подушку в любой машине, а съем зарядов производить с кондуктора, либо заземлить кондуктор, а противоположный заряд снимать с натирающей подушки (рис. 1). Это кон-

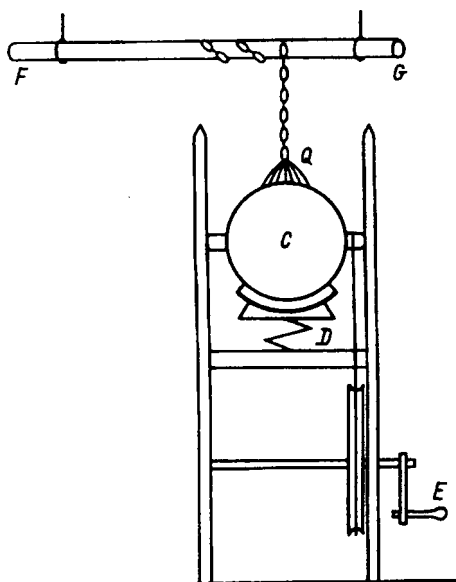


Рис. 1. Конструкция электрической машины трения 50-х годов XVIII в.

структивное решение явилось большим облегчением для электризаторов-медиков, которые «лечили» разнополярным электричеством людей. Кстати, какую бы улыбку не вызывали методы электрического лечения того времени у наших современников, нужно помнить, что именно они привели акушера и физиолога Гальвани к великому открытию.

Продолжение опытов со стеклянными пластинками привело Эпинуса к еще более удивительному результату, важность которого была понята лишь через несколько десятков лет.

Взяв две квадратные стеклянные пластинки, он натер их одна о другую. В качестве индикатора потенциала электрического поля он поднес к соединенным пластинкам маленький пробковый шарик на шелковой нити. При разделении пластинок каждая сначала притягивала шарик, а затем отталкивала. Обе они были заряжены противоположными зарядами [6, с. 75].

Эпинус решает разделять пластинки медленно. Подвесив возле левой пластинки шелковый отвес и натерев пластины друг о друга, он постепенно отодвигает правую пластину. Чем дальше он ее отодвигал, тем больше отклонялся отвес. Если же правую пластину Эпинус приближал к левой, отвес опускался. «Таким образом, — пишет испытатель, — можно заставить подвес подниматься или опускаться сколько угодно раз, в зависимости от того, будет ли пластина отдаляться или же будет к ней больше приближаться» [рис. 2].

Эпинус провел такие же опыты не только со стеклом, но и с другими материалами. «Опыт совершенно также удастся, — писал он, — не-

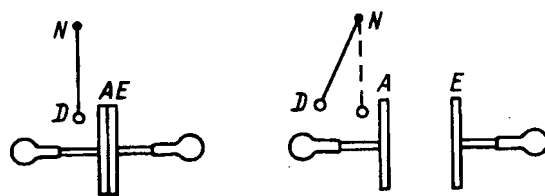


Рис. 2. Конденсатор переменной емкости с примитивным электроскопом в опытах Ф.У.Т.Эпинуса

зависимо от того, будут ли обе пластинки стеклянные или будут сделаны из расплавленной серы или из металла».

Сейчас совершенно ясно, что Эпинус экспериментировал с плоским конденсатором, где диэлектриком был воздух. Но тогда такого названия не было, а накопители электричества носили названия лейденских банок и франклиновых досок и диэлектриками у них было стекло. Отличительной чертой накопителя электрических зарядов, используемого Эпинусом в опытах, было то, что в процессе опыта он менял свою емкость. Такого понятия, как электрическая емкость, тогда тоже не существовало, но был неоспоримый факт, что количественно больший заряд собирался в стекле более тонком и при больших площадях обкладок.

Результаты опытов Эпинуса решил использовать в своих исследованиях А.Вольта. Дело в том, что, создав свой знаменитый «вольтов столб», он стал перед необходимостью доказательства тождественности электричества «столба» и так называемого обыкновенного электричества.

Конструктивно Вольта объединил устройство Эпинуса с электроскопом и назвал его конденсатором, то есть «сгустителем» электричества. Название как нельзя лучше подходило к прибору, который позволял не только накапливать заряды, но и увеличивать (сгущать) потенциалы на выводах (электродах).

Современная электрическая схема установки А.Вольты представлена на рис. 3, где подключены испытуемый «вольтов столб», конденсатор переменной емкости и статический вольтметр (электромметр). Установка работала следующим образом. Конденсатор заряжали от «вольтова столба», а затем резко уменьшали его емкость. Известно, что между емкостью конденсатора, электрической

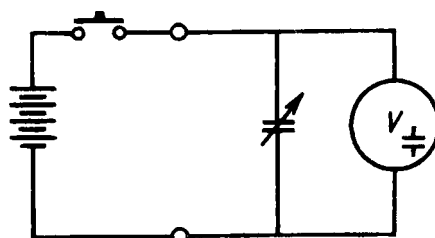


Рис. 3. Электрическая схема установки А.Вольты для проверки тождества электрического и трибоэлектрического

разность потенциалов на нем и зарядом конденсатора существует зависимость

$$U = \frac{Q}{C}.$$

Вполне понятно, что, если не изменять заряд, а уменьшить емкость конденсатора, например в десятки раз, во столько же раз увеличится разность потенциалов.

Конструкции первых электроскопов не позволяли измерять напряжение на выводах гальванических элементов. Они были для этого слишком грубыми, но с применением конденсаторов переменной емкости давали вполне приемлемые для опытов показания.

В 1775 г. Вольта сообщил, что «ему удалось при помощи своего конденсатора прямо доказать и измерить электричество, получающееся при соприкосновении металлов без всякого участия животных мышц» [9]. Впрочем, вышеупомянутую закономерность надо было вывести, но, видимо, Вольта чувствовал ее интуитивно.

Труды Эпинуса высоко ценились А. Вольта, и в одном из его сочинений можно прочитать, что труд петербургского академика «по-видимому, недостаточно известен или плохо понят большей частью физиков, которые писали относительно электричества» [6].

О том, что это так и есть, свидетельствуют работы исследователей даже в наше время. Некоторые историки науки считают конденсатор Вольты видоизменением электрофора [7, с. 179], а известный английский физик Г. Липсон в 1972 г., описывая эти опыты, говорит: «Я затрудняюсь сказать, кто первый произвел этот

опыт, но, во всяком случае, он убедительно доказывает, что оба электричества в действительности одно и то же» [10].

В дальнейшем прибор Вольты получил название электроскопа с конденсатором и стал общеупотребительным лабораторным прибором [11]. Термин «конденсатор» распространился теперь на все электрические емкости и не всегда отражает смысл, вложенный в него А. Вольта, особенно в цепях переменного тока.

Точная дата опытов, производимых Ф. У. Т. Эпинусом, не известна, но, скорее всего, это 1757–1758 гг., а место проведения — Санкт-Петербург.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1. — М.: Изд. АН СССР, 1974.
2. Эйлер Л. Переписка. Аннотированный указатель. — Л.: Наука, 1967.
3. Радовский М. И. Б. Франклин и его связи с Россией. — М.: Изд. АН СССР, 1958.
4. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики с древнейших времен до конца XVIII века. — М.: Наука, 1974.
5. Крыжановский Л. Н. Электрические конденсаторы в XVIII веке. — Электронная техника. Сер. радиодетали и радиокомпоненты. Вып. 4(85), 1991.
6. Эпинус Ф. У. Т. Мемуар, содержащий точное описание опытов с турмалином / Эпинус. Теория электричества и магнетизма. АН СССР — М.: Изд-во АН СССР, 1951.
7. Даннеман Ф. История естествознания, т. III. — М.: ОНТИ НКТП СССР, 1938.
8. Wilcke J. De electricitatibus contrariis. — Rostock, 1757.
9. Розенбергер Ф. История физики, ч. III. вып. I. — М.; Л.: АН СССР, 1935.
10. Липсон Г. Великие эксперименты в физике. — М.: Мир, 1972.
11. Хвольсон О. Д. Курс физики, т. IV. — Берлин: Росиздат РСФСР, 1923.

Хасанов Б. Г.

Камо Серопович Демирчян

(К 70-летию со дня рождения)

Исполнилось 70 лет со дня рождения выдающегося ученого в области теоретических основ электротехники, академика РАН, доктора технических наук, профессора Камо Сероповича Демирчяна.

В скромной армянской семье учительницы и военно-служащего в будущем ученом воспитали стремление к знаниям, доброе отношение к людям, любовь к Родине.

Необыкновенная жажда знаний привела молодого Камо Демирчяна в Ленинградский политехнический институт, где расцвел его талант выдающегося ученого. В 1953 г. он с отличием окончил электромеханический факультет ЛПИ. Судьба была благосклонна к молодому специалисту: научную деятельность он начал в выдающейся школе теоретических основ электротехники, основанной В.Ф. Миткевичем и Л.Р. Нейманом. Большую часть своей творческой жизни К.С. Демирчян связал с ЛПИ. В 1959 г. он защитил кандидатскую диссертацию, в которой предложил метод моделирования электромагнитных полей в неоднородных средах и провел ряд оригинальных теоретических и экспериментальных исследований, использованных промышленностью для решения сложных задач коммутации машин постоянного тока и моделирования магнитного поля добавочных полюсов, определения параметров электрических машин большой мощности с учетом электромагнитных процессов в сплошных массивах ротора, исследования магнитных полей воброгендов.

К.С. Демирчян обладает иск-



лючительным даром педагога и методиста, умеющего с предельной простотой и наглядностью излагать сложные научные проблемы. Эти качества и незаурядные способности молодого ученого были замечены академиком Л.Р. Нейманом, который привлек К.С. Демирчяна к созданию фундаментального учебника по теоретическим основам электротехники.

К.С. Демирчяном были написаны разделы, посвященные новым методам анализа, синтеза и численных расчетов электрических цепей и систем, а отличительной особенностью учебника в целом стали глубина и ясность изложения сложных понятий и методов электротехники с одновременной строгостью подходов и практической направленностью материала.

Учебник, выпущенный в 1966 г., выдержал несколько изданий и в настоящее время является основным для подготовки инженеров электротехнического профиля.

Фундаментальное учебное пособие «Руководство к лабора-

тории электромагнитного поля», написанное также в соавторстве с Л.Р. Нейманом и изданное в 1961 г., представляет собой серьезную основу для формирования навыков научных исследований студентов электроэнергетического профиля старших курсов.

В 1965 г. кафедры ТОЭ и ТВН Ленинградского политехнического института (ныне СПбГТУ) выступили инициаторами подготовки инженеров по специальности «Инженерная электрофизика и электродинамика электрофизической аппаратуры». В организации этого направления подготовки специалистов самое активное участие принял К.С. Демирчян. Именно в те годы была начата подготовка преподавателей по ТОЭ.

В 1968 г. К.С. Демирчян защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Моделирование и расчет магнитных полей в электроэнергетических устройствах». Особую значимость в докторской диссертации и в ряде последующих работ К.С. Демирчяна имеет развитие теории метода обобщенного скалярного магнитного потенциала для анализа и численного расчета стационарных и квазистационарных магнитных полей, позволяющего существенным образом расширить круг решаемых задач электротехники. Этот фундаментальный труд явился основой целого цикла исследований, проведенных его последователями и учениками, для определения электромагнитных характеристик энергетических устройств развития комплексного подхода к решению задач теоретической элект-

ротехники, разработки методов анализа трехмерных магнитных полей с использованием численных методов. Особо следует отметить цикл работ, выполненных им совместно с В.Н. Бороным по использованию для этих целей аналогового процессора.

Исследования легли в основу развития нового направления расчета трехмерных вихревых полей в проводящих средах, по тематике которого проведено несколько международных конференций.

Обобщением этого этапа работы послужила фундаментальная монография «Моделирование магнитных полей», опубликованная в 1971 г. и ставшая основополагающей для научных разработок конкретных магнитных систем.

Избрание в 1973 г. К.С. Демирчяна директором НИИ физико-технических проблем электроэнергетики ЛПИ способствовало усилению теоретических исследований ученых электромеханического факультета и укреплению связей с промышленностью. Именно в этот период под руководством К.С. Демирчяна был проведен комплекс исследований и внедрение их результатов в различные отрасли промышленности, занимающиеся проектированием и созданием конструкций электроэнергетических устройств.

Результаты научных разработок К.С. Демирчяна использовались Всесоюзным институтом трансформаторостроения, Всесоюзным институтом электросварочного оборудования, Научно-исследовательским институтом постоянного тока, Ленгидропроектом, Всесоюзным научно-исследовательским институтом электромашиностроения, Институтом высоких температур РАН и др.

В 1975 г. проф. К.С. Демирчян избран заведующим кафедрой теоретических основ элект-

ротехники ЛПИ. Он продолжил начатое Л.Р. Нейманом внедрение в учебный процесс вычислительной техники и широкое использование новых современных численных методов анализа электрических цепей и электромагнитных полей. Итоги глубоких исследований К.С. Демирчяна в этой области изложены в книгах «Машинные расчеты электромагнитных полей» в соавторстве с В.Л. Чечуриным и «Моделирование и машинный расчет электрических цепей» в соавторстве с П.А. Бутыриным.

В 1976 г. К.С. Демирчян избран членом-корреспондентом, а в 1984 г. действительным членом Российской Академии наук по Отделению физико-технических проблем энергетики.

В 1978 г. К.С. Демирчян был приглашен на работу в Москву в АН СССР и стал заведовать кафедрой ТОЭ в МЭИ. Ведущий специалист в области теоретических основ электротехники, он сохраняет творческую связь с кафедрой ТОЭ СПбГТУ, которая способствует поддержанию высокого уровня отечественной школы теоретической электротехники. Научные разработки К.С. Демирчяна, его идеи оказали большое влияние на направления научных исследований. Человек энциклопедических знаний и большой эрудиции, он щедро делится ими со своими учениками; под его непосредственным руководством получили путевку в научную жизнь более 50 кандидатов и докторов технических наук.

Фундаментальной можно назвать возглавляемую К.С. Демирчяном научную работу последних лет, посвященную созданию системы автоматизации проектирования и технологической реализации заказной дискретной техники на основе ее описания на языке высокого уровня и соответствующей программой поддержки, описывающей данное устройство до межэлементных соединений. Ре-

зультаты этих исследований реализованы на электрически перепрограммируемых матричных схемах. К сожалению, эта разработка в силу переживаемых страной трудностей так и не стала достоянием широкой практики.

Важный этап развития проблем теоретической электротехники связан с созданием прецизионных технологий, основанных на взаимосвязанном комплексе многокоординатных шаговых двигателей, силовой преобразовательной техники систем ориентации и управления движения, в максимальной мере использующих особые свойства электромагнитных полей. Работы, которые велись в течение восьми лет большой группой ученых МЭИ под руководством К.С. Демирчяна и Б.А. Ивоботенко в кооперации с организациями четырех министерств СССР, союзных республик, ученых ГДР и Югославии, завершились созданием действующих макетов полностью автоматизированных устройств, позволяющих «замкнуть на конструктора» всю цепь конструирования и изготовления.

Мировое признание получили статьи и выступления К.С. Демирчяна на международных конференциях, посвященные влиянию энергетики на глобальное изменение климата планеты.

Научные заслуги К.С. Демирчяна широко признаются как у нас в стране, так и за рубежом. За работы в области сверхпроводимости, выполненные с его участием, была присуждена Государственная премия.

К.С. Демирчян является лауреатом премии РАН имени П.Н. Яблочкова, которой он удостоен за цикл совместных с Ю.В. Ракитским исследований, посвященных разработке новых методов анализа жестких систем.

Следует отметить весьма плодотворную работу К.С. Демирчяна в качестве члена Меж-

дународной электротехнической комиссии (МЭК) по рабочей группе 05 (термины и определения).

К.С. Демирчян проводит большую научно-организационную работу, являясь в 60-е годы заместителем председателя, а с 1980 г. — председателем Научного Совета АН СССР по использованию сверхпроводимости в энергетике и председателем секции Совета Академии наук по теоретическим и электрофизическим проблемам энергетике. Одновременно он — за-

меститель председателя Совета МВ и ССО по теоретическим основам электротехники и инженерной электрофизике и председатель одной из секций этого Совета.

С 1980 г. К.С. Демирчян является заместителем академика-секретаря Отделения физико-технических проблем энергетики РАН, председателем Научного Совета РАН «Научные проблемы электрофизики, электроэнергетики, электротехники», председателем Научно-методического Совета по теоретиче-

ским основам электротехники, членом президиума Академии электротехнических наук Российской Федерации.

Многие годы К.С. Демирчян — главный редактор журнала «Известия АН. Энергетика».

Выдающимися способностями и творческим горением К.С. Демирчян вносит исключительный вклад в развитие современной электротехники и энергетики. Этим он снискал высокий авторитет у отечественных и зарубежных ученых.

Иван Филиппович Кузнецов

(К 70-летию со дня рождения)

Исполнилось 70 лет Ивану Филипповичу Кузнецову, доктору технических наук, профессору кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Иван Филиппович Кузнецов родился в Архангельской области, в 1952 г. окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института по специальности «Электрические станции, сети и системы» и был оставлен в институте на кафедре «Теоретические основы электротехники» электромеханического факультета. С этой кафедрой связана вся дальнейшая научная и общественная жизнь Ивана Филипповича. Здесь он работал ассистентом (1952—1960), старшим преподавателем (1960—1964), доцентом (1964—1979), старшим научным сотрудником (1979—1984); с 1984 г. и по настоящее время он занимает должность, профессора кафедры. Соответственно росла и научная квалификация Ивана Филипповича: в 1964 г. он защитил кандидатскую диссертацию, в 1977 г. — докторскую. В 1977—1978 гг. Иван Филиппович был

деканом электромеханического факультета.

Сфера научных интересов И.Ф. Кузнецова весьма широка. Он один из создателей численно-аналитических методов для определения электромагнитных характеристик токоведущих частей электроэнергетических устройств предельных мощностей. Его научные работы 1958—1961 гг. связаны с разработкой теоретических и эксплуатационных методов определения электромагнитных характеристик токоведущих частей электроэнергетических устройств, электрических аппаратов, токопроводов генераторного напряжения, многопроводных проводов высоковольтных линий электропередачи. Результаты этих исследований нашли воплощение при создании генераторных токопроводов Братской, Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС. Научным итогом этих работ явилась подготовка и издание в 1983 г. совместно с В.Н. Борониным и К.С. Демирчяном книги «Поверхностный эффект в электроэнергетических устройствах».

Научная деятельность Ивана Филипповича Кузнецова многогранна. В 70-х годах он провел

исследования электромагнитных, тепловых и механических процессов в мощных магнито-стрикционных преобразовательных устройствах, а также разработал численно-аналитические методы определения электромагнитных параметров и электродинамических усилий в сверхпроводящих кабельных линиях. Итог этих исследований был подведен в книге «Электродинамические усилия в токоведущих частях электрических аппаратов и токопроводах», написанной совместно с Г.Н. Цицикяном.

В 80-х годах практическая и научная деятельность И.Ф. Кузнецова была направлена на исследование сверхпроводящих кабелей и магнитных систем, создание экспериментальной базы для определения электромагнитных параметров и свойств сверхпроводниковых устройств. При его непосредственном участии на кафедре «Теоретические основы электротехники» была создана лаборатория для исследования параметров токоведущих частей, используемых в электроэнергетике, сварочном оборудовании, устройствах автоматики.

Большое внимание Иван

Филиппович уделяет педагогической работе. Один из наиболее опытных и квалифицированных преподавателей кафедры ТОЭ, он известен своим доброжелательным отношением к студентам, что органично сочетается у него с высокой требовательностью. Иван Филиппович — автор ряда учебных курсов, среди которых следует выделить «Сверхпроводимость» и «Электродинамические усилия в мощных токоведущих систе-

мах». Большую педагогическую работу ведет юбиляр и в настоящее время. Практическую деятельность педагога и профессора Иван Филиппович успешно сочетает с большой научно-методической работой в качестве члена Научно-методического совета по теоретическим основам электротехники.

И.Ф. Кузнецов — член четырех диссертационных советов при СПбГТУ и ВНИИ электромаш. Среди его учеников свыше

10 кандидатов наук, он являлся научным консультантом ряда докторских диссертаций.

И.Ф. Кузнецов — крупный ученый с широким научно-техническим кругозором. Список его научных и научно-методических трудов насчитывает более 120 названий. Его плодотворная научно-педагогическая деятельность отмечена правительственными наградами.

Виктор Иванович Попов

(К 60-летию со дня рождения)

Исполнилось 60 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента Российской академии электротехнических наук, главного научного сотрудника и руководителя научно-исследовательской лаборатории электромеханики (НИЛЭ) Волжского государственного инженерно-педагогического института (ВГИПИ, Н. Новгород) Виктора Ивановича Попова.

В.И. Попов родился в Ереване, окончил в 1962 г. электротехнический факультет Ереванского политехнического института (ныне Государственный инженерный университет республики Армения) и работал в этом вузе ассистентом кафедры «Электрические машины и аппараты» в 1962—1964 гг. В 1964 г. поступил в очную аспирантуру кафедры «Электрические машины» Горьковского политехнического института (ныне Нижегородский государственный технический университет), где в 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию, а затем работал на той же кафедре преподавателем, доцентом, профессором до 1988 г. Докторскую диссертацию защитил в МЭИ в 1986 г. по электромашинным совмещенным преобразователям энергии; в уче-



ном звании профессора утвержден в 1990 г. С 1988 по 1993 гг. работал профессором кафедры «Теоретические основы электротехники и электрооборудование судов» Горьковского (Нижегородского) института инженеров водного транспорта, а с 1993 г. по настоящее время — в Волжском государственном инженерно-педагогическом институте главным научным сотрудником и руководителем научно-исследовательской лаборатории электромеханики; здесь с 1997 г. он заведует (по совместительству) инженерно-технической кафедрой.

Проф. В.И. Попов является известным специалистом в об-

ласти электрических машин, его научная деятельность связана с разработкой специальных (совмещенных) электрических машин переменного тока и схем многофазных электрически совмещенных обмоток для них, а также с исследованием схем трехфазных обмоток при целых и дробных числах пазов на полюс и фазу с пониженным дифференциальным рассеянием для асинхронных и синхронных машин.

Выполненные В.И. Поповым научные исследования отличаются новизной, оригинальными и эффективными техническими решениями на уровне изобретений, тесной связью с практикой электромашиностроения. В разные годы, начиная с аспирантской деятельности, он сотрудничал с заводами и НИИ электромашиностроения Еревана, Выборга, Владимира, Москвы, Ярославля.

С 1967 г. В.И. Попов тесно сотрудничает с отделом главного конструктора Ярославского электромашиностроительного завода (ЯЭМЗ) и с 1993 г. является его научным консультантом. По разработкам В.И. Попова на ЯЭМЗ освоено с 1981 г. серийный выпуск трехфазных асинхронных одномашинных

преобразователей частоты типа ОПЧС—50/200 Гц, внедрены в производство новые схемы трехфазных обмоток асинхронных машин. Он принимал непосредственное научное участие в создании на ЯЭМЗ новой российской серии РА асинхронных машин мощностью до 100 кВт

на высотах оси вращения 71—280 мм, разработал для этой серии высокоэффективные схемы трехфазных обмоток и методики электромагнитных расчетов.

В.И. Попов является автором четырех монографий, множества научных статей, в том числе в журнале «Электричество», свыше

300 авторских свидетельств и 50 патентов России на изобретения. Им подготовлены свыше 100 инженеров-электромехаников, кандидаты технических наук и два доктора электротехники. В 1995 г. он избран членом-корреспондентом РАЭН.

Лев Николаевич Макаров

(К 60-летию со дня рождения)

Исполнилось 60-лет со дня рождения заместителя генерального директора по науке и начальника НИЦ Ярославского электромашиностроительного завода — ОАО «ЯЭМЗ—ELDON», доктора электротехники, лауреата премии Правительства Российской Федерации 1997 г. в области науки и техники Льва Николаевича Макарова.

Л.Н. Макаров родился в Ярославле, с 1961 г. после окончания электромеханического факультета Ивановского энергетического института — ИЭИ (ныне Ивановский государственный энергетический университет) непрерывно работает на Ярославском электромашиностроительном заводе (ЯЭМЗ) в должностях: инженера-конструктора (1961—1966), начальник Лаборатории испытаний электрических машин (1966—1971), главного конструктора (1971—1975), главного инженера (1975—1981), директора (1981—1984) и с 1984 г. — заместителя генерального директора по науке и начальника Научно-инженерного центра (НИЦ).

Без отрыва от производства Л.Н. Макаров успешно окончил аспирантуру при ИЭИ, в 1972 г. защитил во ВЗПИ кандидатскую диссертацию по электрическим машинам постоянного тока с разомкнутой обмоткой якоря и ведет плодотворные на-



учные исследования по усовершенствованию конструкции машин постоянного тока, асинхронных двигателей основного и специализированных исполнений, непосредственно участвует в разработке и промышленном освоении на ЯЭМЗ трехфазных АД единых общесоюзных серий АО2, 4А, 4АМ160, АИР.

В 1992 г. под научным руководством Л.Н. Макарова на ЯЭМЗ с привлечением к сотрудничеству крупных отечественных специалистов и ученых-электромехаников начались крупномасштабные работы по созданию новой серии РА асинхронных машин мощностью до 100 кВт для высот оси вращения 71—280 мм с показателями мирового уровня элект-

ромашиностроения. Промышленное освоение в 1995 г. на ЯЭМЗ первой в России серии асинхронных машин РА, удостоенной премии Правительства Российской Федерации 1997 г. в области науки и техники, позволило резко сократить импорт АД и успешно экспортировать их в промышленно развитые страны мира.

По результатам комплексных научно-исследовательских и конструкторско-технологических работ, реализованных при разработке серии РА, Российская академия электротехнических наук (РАЭН) присуждает Л.Н. Макарову в 1996 г. ученую степень доктора электротехники, а ОАО «ЯЭМЗ—ELDIN», как один из признанных лидеров отечественного электромашиностроения, становится коллективным членом РАЭН.

Лев Николаевич автор и соавтор свыше 150 научных публикаций и 50 авторских свидетельств и патентов России на изобретения в области электротехники.

Научная эрудиция, профессионализм и организаторские способности снискали Л.Н. Макарову заслуженный авторитет и известность среди отечественных и зарубежных ученых и специалистов-электромехаников.

Зарубежные читатели могут оформить подписку на наш журнал (на русском языке) через следующие фирмы:

Foreign readers can take a subscription to our magazine (in Russian) through the following companies:

Albania

Botimpex
Publications Import—Export
Agency
Rr. «Naim Frasheri»
P.84
Sh.2 Ap.37
Tirana
Tel./Fax: 26886

Australia

C.B.D. Library and
Subscriptions Service
P.O. Box 255
Plympton
South Australia 5038
Fax: 82938 150

Centre for Russian and
Euro-Asian Studies
135, Barry street
Carlton, Vic. 3052
Tel.: 344-5956
Fax: 344-5590

Cordon and Gotch Ltd.
Private bag 290
Burwood Vic. 3125
Tel.: 805-1650
Fax: 808-0437

Eastern Europe Trading
Company
136 Balaclava Road
Caulfield North Victoria 3161
Melbourne

Azerbajdzhan

Firma «Yurd»
37001 Baku,
Niyazi, 11
Tel.: 92-89-57
Fax: 92-91-55

Беларусь

220004 Минск,
ул. Короля, 16
Изд-во «Красико-Принт»
Тел.: 20-55-54
Факс: 20-26-14

Belgique

Librairie du Monde Entier
110, BLD.H.Max
B-1000, Bruxelles
Fax: 223-2652

Brasil

Livraria V.Rozov
Rua 24 de Maio, 35
3 Andar, cj. 312
Cep. 01041 São Paulo
Fax: 578-2074

България

«Hemus» Books & Press
1000 София
Й «Raiko Daskalov Square»
Fax: 88-34-19

«Razprostranenie na petchata»
1202 София
Klokotnitsa, 2A
Fax: 31-60-37

Canada

Troyka Limited
799 College Street
Toronto, Ontario
Canada M6G 1C7
Tel.: 535-6693
Fax: 535-3265

China

China National Publications
Import-Export Corp.

P.O. box 88, 16 Congthi E.Road
Chaoyang District, Beijing
100704, PRC
Fax: 506-3101

Croatia

Tamaris
Book Imported and
Subscription Agent
Petrinska, 11
41000 Zagreb

Česká Republika

«První Novinová Společnost A.S.»
Hvozdanska, 5-7
14831 Praha 4
Fax: 793-4607

Danmark

Arnold Busck
International Boghandel A/S
49 Kobmagergade
DK-1150 København K
Tel.: 12-24-53
Fax: 93-04-34

MUNKSGAARD

Subscription Service
35 Norre Sogade
P.O. Box 2148
DK-1016 København K
Tel.: 12-8570
Fax: 12-9387

G.E.C.GAD Stakbogladden
Slavic Department
NDR. Ringgade 3
DK-8000 Aarhus C
Tel.: 12-8844
Fax: 20-9102

RHODOS

International
Subscription Agency
Niels Brocks Gard
36 Strandgade
DK-1401 København K
Tel.: 54-3060
Fax: 96-2245
Slavisk Boghandel
5 Christian IXs Gade
DK-1111 København K
Tel.: 31-3826
Fax: 11-3826

Eesti

eesti Ajakirjanduslevi
Tuukri Poik 6, EE 0102
Tallinn
Tel.: 42-6065
Fax: 42-93-46

England

Dawson UK Ltd.
Cannon House, Park Farm Road
Folkestone
Kent CT 19 5EE
Tel.: 85-0101
Fax: 85-0440

W.H.Everett and Son Ltd.
8 Hurlingham Business Park
Sullivan Road
London SW6 3DU
Tel.: 731-8562
Fax: 371-5870

B.H.Blackwell Ltd.
Periodicals Division
P.O. Box 40
Hythe Bridge Street
Oxford
England OX1 2EU
Tel.: 79-2792
Fax: 79-1438

Nordic Subscription
Consultants

P.O. Box 2029
Sturminster Newton
Dorset DT 10 1YE
Tel.: 82-1114
Fax: 82-1115

Thornton's of Oxford Ltd.
11 Broad Street
Oxford OX1 3AR
Tel.: 24-2939
Fax: 20-4021

Slavonic Acquisitions
The British Library
Document Supply Centre
Boston SPA
Wetherby
West Yorkshire
LS 23 7BQ

España

Libreria Rubinos
Alcala 98
Madrid 28009
Tel.: 435-2239
Fax: 575-3272

France

«MK Librairie du Globe»
2 Rue de Buci
75006 - Paris
Fax: 43 25 50 55

Dawson France
Rue de la Prairie
B.P.57
91871 Palaiseau Cedex
Tel.: 69 10 47 00
Fax: 64 54 83 26

«Lavoisier Abonnement»
14 Rue de Provigny
94236 Cachan Cedex

Deutschland

Lange & Springer
Wissenschaftliche
Buchhandlung GmbH &
Co.KG
Otto-Suhr-Allee 26/28
D-10 585 Berlin
Tel.: 340-05-0
Fax: 342-06-11
Buchhandlung «Raduga»
zu Hd. Frau Nina Gebhard
Friedrichstrasse 176-179
D-10117 Berlin
Tel.: 203-02321

Hellás

«Giannicis S.A.»
18 Fidiou str.
Athens 10678
«Hellenic Distribution»
Agency Ltd.
1 Digeny Str.
17456 Alimos
Tel.: 995-5383
Fax: 993-6043

Hong Kong

Apollo Books Co. Ltd.
T.S.T.P.O. Box 95170
Kowloon
Fax: 369-5282
Great Eastern Book Co.
P.O. Box 20005
HENNESSY Post Office
Tel.: 527-7459
Fax: 527-2172
Sinminchu Publishing Co. Ltd.
Rm.1015, Tower A
Hunghom Commercial
Centre
39 Ma Tau Wai Road
Hunghom, Kowloon

Tel.: 334-9327
Fax: 765-8471

Island

Skakhusid-the Chess House
Laugavegi 118
105 Reykjavik
Iceland
Tel.: 11-9768
Fax: 551-9768

India

International Journals
Distribution Agency, 4-E/15
Jhandewalan, New-Delhi
110005

Israel

Knizhnaia Lavka Ltd.
P/O/Box 11626
Tel-Aviv, 61116
Fax: 528-9735
«Steimatzky Ltd.»
11 Hakishon Str.
P.O. Box 1444
Bnei-Brak, 51114
Fax: 579-4567

Italia

Libreria Edest
Via Cairoli 12/4
16124 Genova
Fax: 297703
Il Punto Editoriale S.A.S.
Via della Cordonata 5
00187 Roma
Fax: 679-505
Editoriale Stampa
Triestina SpA
Via Montecchi 6
34137 Trieste

Japan

Nauka Ltd.
2-30-19 Minami Ikebukuro
Toshima-ku, Tokyo, 171
Tel.: 981-5266
Fax: 981-5313
Nisso Ltd.
Omiya dai 2 bldg. 6f
4-1-7 Hongo
Bunkyo-ku
Tokyo, Japan
Tel.: 811-6481
Fax: 811-5160

Југославија

Jugoslovenska Knjiga
Pretpolata
P.O. Box 36
11000 Београд
Try Republike

Korea

Universal Publications
Agency Ltd.
C.P.O. Box 9084
Seoul, 100-690
Tel.: 735-7809
Fax: 723-3890

Kýpros

Odigitis Bookshop
1A Romanos Str.
Nicosia
Fax: 45-37-57

Latvija

Latvijas Pasts
LV-1000 Riga
Brivibas bulvari, 21

Tel.: 701-8842
Fax: 701-8754
000 «SCS» 7, Riga,
LV-1010, Valkas, 4
"Diena"
Mukusalas, 41
Riga, LV-1004
Tel.: 706-3170
Fax: 706-3168

Luxembourg

Messageis «Paul Kraus»
B.P.2022
11. Rue Christophe Plantin
L-2339

Magyarország

MKM Dunatrade KFT
1035 Budapest III.
Kerek u.80
Tel.: 250-2358
Fax: 250-0233

Македонија

Knjigoizdatelstvo Makedonska
Knjiga
ul. 11 Oktomvri, b.b.
91000 Скопје
Народна и Универзитетска
Библиотека
Климент Охридски
булв. Тоце Делуев, 6
91000 Скопје

Nederland

Pegasus Subscription
Department
P.O.Box 11470
1001 GL Amsterdam
Tel.: 623-1138
Fax: 620-3478
Martinus Nijhoff International
P.O. Box 269
2501 AX 's-Gravenhage
Tel.: 684-400
Fax: 615-698

New Zealand

Mercury Direct Marketing
P.O. Box 24013 and 24235
Royal
OAK Auckland
2 Carr Road MT Roskill
Auckland
Tel.: 625-3010
Fax: 625-3006

Norge

Akademika Universitetsbokhandel
P.O. Box 84-Blindern
N-0314 Oslo
Tel.: 853-030
Fax: 853-053

Österreich

Gerold & Co.
Graben 31
1011 Wien
Tel.: 533-50-140
Fax: 533-50-1412

Polska

«Ars Polona»
Centrala Handlu
Zagranicznego
Krakowskie Przedmieście, 7
Warszawa
IPS JOURNALS
ul. Piekna, 24/26
00 549 Warszawa
Fax: 621-5470
Orpan
Biuro Importu
Palac Kultury i Nauki
00-901 Warszawa
Fax: 26-8670
«RUCH» S.A.
Oddział Krajowej Dystrybucji Prasy
Dział Współpracy z Zagranicą
ul. Towarowa, 28
00958 Warszawa
Fax: 620-1762
PRESS
Pl. Na Rozdrożu, 3
00 584 Warszawa
Fax: 628-8399

Romania

Rodipet S.A.
Piața Presei Libere No 1 -
Sector 1,
București

Србија

PROEX EXPORT-IMPORT
AGENCY
TERAZIJE, 16/1,
1001 Београд

Slovakia

PNS S.P.
Pribinova 25
813 81 Bratislava
Fax: 566-4814

«Slovart» G.T.G. Ltd.
Krupinska, 4
852 99 Bratislava 5
Fax: 839-485

Slovenia

Cankarjeva Založba
P.O. Box 201-IV
61001 Ljubljana
Državna Založba Slovenije
P.O. Box 50-I
61000 Ljubljana

Suisse

Pinkus Genossenschaft
Froschaugasse 7
Postfach 8025 Zürich
Tel.: 251-2674
Fax: 251-2682
Librarie Cobram
Rue due Grand Pre 11
CH-1211 Geneve 7
Tel.: 733-9512
Fax: 740-1530
Dynapress Marketing S.A.
Subscription Dept.
38 Avenue Vibert, CH-1227
Carouge, Geneve
Tel.: 308-0444
Fax: 308-0859

Suomi

OY TIBO-TRADING AB
Subscriptions Department
P.O. Box 33
SF-21601 Pargas
Tel.: 214589-355
Fax: 214589-164
SUOMALAINEN
KIRJAKAUPPA
Subscription Department
P.O. Box 2
SF-01641 Vantaa
Tel.: 9852-751
Fax: 9852-7990

Akateeminen Kirjakauppa
Services Subscription
PL/PB 23
SF-00371 Helsinki
Tel.: 12141
Fax: 121-4450

Hansel Ltd.
P.O.Box 108
00381 Helsinki
Tel.: 560-21
Fax: 560-2360

Translatio Rustica
Isonniytinkatu 3A
SF-00520 Helsinki
Tel.: 777-2357
Fax: 757-1295

Sverige

Wennergren-Williams
Informationsservice AB
Subscription Department
P.O. Box 1305, S-17125 Solna
Tel.: 7059-750
Fax: 2700-71

Bibliotekstjänst AB
Subscription Department
Traktorv. 11, Box 200
S-22100 Lund
Tel.: 180-000
Fax: 307-947

USA

Victor Kamkin
Bookstore INC
4956 Boiling Brook Parkway
Rockville, MD 20852
Tel: 881-5973
Fax: 881-1637
Victor Kamkin
Bookstore, Inc.
925 Broadway
New York, N.Y. 10010
Tel.: 673-0776
Znание Book Store
5237 Geary Boulevard
San Francisco, CA 94118
Tel.: 752-7555
Fax: 752-4347
Almanac Press, Inc.
501 South Fairfax Avenue
Suite 206
Los Angeles, CA 90036
Tel.: 931-2692
Fax: 931-7748

Vietnam

XUNHASABA
32 Hai Ba Trung
Hanoi, S.R.V.
Fax: 8252-860
XUNHASABA
25B Nguyen Binh Khiem
1st District
Hochiminh City
Tel.: 8241-320
Fax: 8241-321

В Москве вы можете оформить подписку на наш журнал с доставкой по любому адресу в любой стране. Обращайтесь по адресу: 117049 Москва, Б.Якиманка, 39, АО «Международная книга», фирма «Периодика».
Контактный телефон 238-4967
Факс 238-4634

In Moscow You can take a subscription to our magazine with a delivery to any address in any country all over the world at: 117049 Moscow, Bolshaya Yakimanka, 39, AO «Mezhdunarodnaya kniga», «Periodika» company.
Contact tel.: (095) 238-4967
Fax: (095) 238-4634

Адреса редакции: 103012 Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10



924-24-80, 928-88-69; факс 315-0698

101000 Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648

Художественный редактор Т.А. Дворецкова

Сдано в набор 25.08.98. Подписано в печать 25.09.98. Формат 60х80/8.
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,8. Заказ

ЗАО «Знак», 103012 Москва, Б. Черкасский пер., 2/10

Отпечатано в типографии МЭИ

111250 Москва, ул. Красноказарменная, д. 13

Dear readers!

We are pleased to inform you that beginning from 1998 the journal «Electrical Technology» is published and distributed by the «Znack» Publishing House (Russia) under the title «Electrical Technology Russia» (ISSN 1028—7957).

As before it is a quarterly edition of the same size and volume. It appears in the form of four annual issues in April, July, October and January.

The «Electrical Technology Russia» is an English version of one of the oldest journals of Russian Academy of Sciences — «Elektrichestvo» (founded in 1880).

Annual (1999) subscription rates: Europe and CIS countries, US\$ 985. All other countries, US\$ 1115. The two-year institutional rate is US\$ 1872 and US\$ 2118 respectively. The three-year institutional rate is US\$ 2748 and US\$ 3111 respectively. Prices include postage and insurance.

The above rates apply to orders for 1 to 5 copies. For orders for 6 to 10 copies the rates are reduced by 7%. For orders for more than 10 copies the reduction is 10%.

If you wish to receive the «Electrical Technology Russia» please advise us of the number of the copies required and the addresses of subscribers. The payment due should be sent to:

BIC-KOD S.W.I.F.T.: SABR RU MM 100
SAVINGS BANK OF THE RUSSIAN
FEDERATION, MOSCOW BANK
KRASNOPRESNENSKOYE BRANCH 1569/01664
/30301840638000603817/
Moscow, B.Gruzinskaya str., 12
JSC «ZNACK»
/40702840538170100450/

At the present time the payment by cheques is not allowed according to regulations of Central Bank of Russia.

*Если Вы работаете в области энергетики или электротехники,
позаботьтесь о том,
чтобы Ваши предприятие, лаборатория, кафедра
не опоздали с подпиской на*

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

- старейший отечественный теоретический и научно-практический журнал, орган Российской Академии наук, Федерации энергетических и электротехнических обществ;
- выходит ежемесячно, предназначен для высококвалифицированных специалистов в области энергетики и электротехники;
- публикует теоретические и научно-практические работы отечественных и зарубежных ученых и инженеров, освещает работу российских и международных конференций, рецензирует учебники и монографии по тематике журнала, помещает материалы по истории электротехники, статьи о выдающихся отечественных ученых;
- журнал поступает во все промышленно развитые страны мира.

*Условия подписки в России и странах СНГ указаны
в Объединенном каталоге Государственного комитета РФ
по связи и информатизации «Подписка-99»*

*Зарубежные читатели могут подписаться на наш журнал
по адресам фирм, указанным на с. 79—80 этого номера,
а также в предыдущих номерах*

*В Москве подписку от зарубежных читателей принимает
АО «Международная книга», фирма «Периодика»
(117049, Б. Якиманка, 39, тел. 238-4967, факс 238-4634)*