

ISSN 0013-5380



# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1992

·ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ·

4

ИЗДАЕТСЯ  
С ИЮЛЯ  
1880 ГОДА

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

4  
АПРЕЛЬ  
1992

УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК, ФЕДЕРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ

МОСКВА

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

УДК 621.3:930

## Фарадей и проблемы современной теоретической электротехники

(доклад на конференции<sup>1</sup>, посвященной 200-летию со дня рождения М. Фарадея)

НЕТУШИЛ А. В., доктор техн. наук

В теме доклада имеется кажущееся противоречие: все труды Фарадея содержат изложение физических экспериментов, постановка и анализ которых отличаются глубоким рассмотрением явлений и их обобщением без единой математической формулы. В то же время современная теоретическая электротехника так насыщена математикой и особенно вычислительными методами, что в ней бывает трудно отделить математические методы от описания сущности.

Это кажущееся противоречие соответствует анализу Максвеллом соотношения между физикой и математикой. Указывая на математическую точность научного языка Фарадея, свободного от математических вычислений, он называет Фарадея «математиком высокого порядка, у которого математики будущего будут черпать благотворные методы». Одновременно Максвелл говорит о существенном различии мыслительных операций над символами чисел или величин, выполняемых математиками и людьми, изучающими физику, и о различиях в классификации величин, выполняемых математиками и физиками.

В этой связи невольно вспоминается дискуссия на тему: «Что такое математика? — служанка или королева?», проводившаяся академиком Штефаном Шварцем около 20 лет тому назад в Словакском политехническом институте. Один из ответов был такой: «Конечно, служанка! Но для того чтобы пользоваться ее услугами, нужно иметь царя в голове». И Фарадей и Максвелл имели могущественного «царя в голове», и у Макс-

велла была хорошая «служанка». В этой дискуссии еще были сказаны и такие слова: «Его величество абсурд, облаченный в математическую мантию, выглядит правдоподобней, чем в обнаженном виде».

Об основных идеях Фарадея, их значении для развития науки об электричестве, о его мастерстве экспериментального изучения законов и его человеческих качествах ученого написано много.

Среди публикаций прежде всего следует назвать первую статью Максвелла «Фарадей», напечатанную через несколько лет после смерти Фарадея в журнале «Nature», и статью И. Е. Тамма «Основные идеи Фарадея и их роль в развитии науки об электричестве» в журнале «Электричество» — 60 лет тому назад. В текущем году к нынешнему юбилею в журнале «Электричество» напечатана очень обстоятельная и эмоциональная статья Я. А. Шнейберга о жизни и деятельности Фарадея.

Перечислим основные научные заслуги Фарадея:

1. Установлено единство всех известных видов электричества и магнетизма. Это по существу системный подход к электричеству.
2. Открыт закон электромагнитной индукции.
3. Открыт основной закон электрохимии.
4. Экспериментально установлена взаимосвязь световых и магнитных явлений, подтверждена гипотеза Ампера.
5. Создана терминология описания электрических и магнитных явлений.

Помимо оценки вклада Фарадея в науку об электричестве необходимо рассказать о нем как о человеке, нравственные качества которого могут служить примером для воспитания многих поколений ученых.

<sup>1</sup> 30—31 октября 1991 г. в Институте истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова (см. раздел «Хроника», с. 63—65).

Предоставим слово его современникам: так, основатель теории электродинамики Максвелл, называвший себя учеником Фарадея, писал: «Нужно надеяться, что его благородная, простая и лишенная драматизма жизнь будет так же долго жить в памяти людей, как и обессмертившие его имя открытия. В нем не было жажды одобрения толпы, не было отклонений от любимой, поставленной перед собой цели — «работать, заканчивать, публиковать».

Максвелл цитирует такие слова о Фарадее французского химика Жана Батиста Дюма: «Его сердечная простота, его искренность, его горячая любовь к истине, его товарищеский интерес ко всем успехам и его искреннее восхищение всеми открытиями других ученых, его природная скромность в отношении собственных открытий, благородство его души, независимой и смелой,— все это вместе придавало образу знаменитого физика несравненное очарование».

Как современно звучат такие слова Максвелла: «...если бы его примеру следовало больше людей, то разве мы не слышали бы реже о людях, не оправдавших «блестящих обещаний» своей юности, успокаивающих себя благодаря «жалованью» или благодаря «приложениям науки», или благодаря преимуществам, связанным с популяризацией чужих работ. Разве мы не слышали бы реже, что исследовательская работа — это один обман и что все попытки помочь ей приводят к использованию общественных средств в личных целях?» К этому можно прибавить много и более современных высказываний о науке и псевдонауке.

При колossalном значении представлений Фарадея об электромагнитных явлениях в природе он всегда понимал, что наши взгляды нуждаются в приспособляемости к вновь открываемым новым явлениям. Об этом говорят его следующие слова: «В науке только тот заслуживает презрения, кто не находится в постоянном процессе развития». Этими словами Фарадея академик Тамм дезавуирует популярный в то время лозунг «Назад к Фарадею». Правда, этот лозунг и сейчас остается в силе, если речь идет о нравственности в науке.

Теперь обратимся к влиянию учения Фарадея на теоретические основы электротехники (ТОЭ) или, сокращенно, теоретическую электротехнику. Хотя это и общепринятое сокращение, но возникает вопрос — можно ли говорить «теоретическая техника?» Уж лучше говорить ТОЭ. Этот термин имеет два определения:

1. Учение об электромагнитных явлениях и способах их применения в технике, о математических моделях и методах расчетов и экспериментальных исследований процессов, протекающих в электротехнических устройствах.

2. Базовый физико-математический инженерный курс, изучаемый всеми студентами электротехнических специальностей вузов.

Два определения — они и совпадают, и противоречат одно другому. В этой связи хочется привести высказывание французского писателя

Шарля Пеги, цитированное Луи Дебройлем: «Нет ничего более противоположного функции науки, чем функция преподавания, поскольку наука требует вечного беспокойства, а преподавание — непоколебимой уверенности».

Далее речь будет идти в основном о втором значении ТОЭ, но при этом будем отдавать предпочтение вечному беспокойству по сравнению с непоколебимой уверенностью.

Начало формирования ТОЭ как курса относится к 1905 г., когда В. Ф. Миткевич в Санкт-Петербургском политехническом институте и К. А. Круг в Московском высшем техническом училище начали читать этот курс, который в значительной степени основывался на идеях Фарадея. В то время его математическое содержание еще не было на уровне теории Максвелла, изложенной в его знаменитом трактате. Только в 30-х годах с усилением математической подготовки студентов в этом курсе начало уделяться внимание теории Фарадея — Максвелла.

Вопросы теории поля изучались по изданной в 1932 г. книге А. П. Александрова и др. «Физика диэлектриков» — под редакцией проф. А. Ф. Вальтера. Она начиналась словами: «Фарадей первый дал определение понятию «диэлектрик». К концу 30-х годов окончательно сформировались курсы ТОЭ Московской и Ленинградской научных школ. Вышло несколько изданий учебников «Основы электротехники» К. А. Круга и «Теоретические основы электротехники» П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана, сыгравших большую роль в электротехнической подготовке инженеров. В Московском энергетическом институте существенно влияли на формирование курса связь кафедр ТОЭ с кафедрами физики и высшей математики и обучение студентов векторному анализу, проводившееся зав. кафедрой высшей математики, чл.-кор. АН СССР Я. Н. Шпильрейном и трагически оборвавшееся в 1937 г. Тогда же из числа авторов исчез работавший на той же кафедре А. А. Витт, соавтор А. А. Андронова и С. Э. Хайкина по широко известной книге «Теория колебаний» издания 1937 г.

В послевоенные годы развитие ТОЭ связано с именами академика Л. Р. Неймана и профессора К. М. Поливанова, возглавившими Ленинградскую и Московскую электротехнические школы.

Очень большая работа была проведена Л. Р. Нейманом по упорядочению терминологии теоретической электротехники. Здесь русские ученые продолжили работу Фарадея, уделявшего терминологии много внимания. Максвелл об этом так пишет: «Фарадей постарался отнять у таких терминов как «электрический флюид», «ток» и «притяжение» всякое другое значение, кроме того, которое подтверждается самим явлением; вместе с тем он изобрел новые термины, например, «электролиз», «электрод», «диэлектрический», ... «силовое поле», «силовые линии», «индукция» и т. п.». Новым терминам он придавал большое

значение и, вводя новые термины, обсуждал их со своими коллегами — физиками, филологами и лингвистами, специалистами в древних языках. Именно поэтому многие из введенных им терминов широко применяются и теперь.

Иначе протекала работа комиссии по терминологии, возглавляемой Л. Р. Нейманом. Директивные указания высшего руководства в те годы требовали искоренения низкопоклонства перед Западом, изъятия иностранных терминов и «идеализма» из научной терминологии. Очень большая работа, проводимая комиссией, была омрачена необходимостью замены таких терминов, как «эффективное значение», «кажущаяся мощность» и других на термины «действующее значение», «полная мощность» и т. д., хотя эта замена далеко не шла на пользу пониманию сущности этих терминов и их защищенности от ошибок.

В то же время были и большие достижения: например, после широкого обсуждения с физиками было введено определение основных векторов теории электромагнитного поля и четко разделены физические и расчетные величины. Для электрического поля в вещественных средах названы физические векторы — «напряженность» и «поляризованность» и расчетный вектор «электрическое смещение».

Аналогично для магнитного поля рекомендовано назвать физические векторы: «магнитная индукция» и «намагниченность», а «напряженность магнитного поля» явилась расчетным вектором. Эти понятия соответствовали основанным на гипотезе Ампера физическим представлениям, излагаемым в курсах физики и ТОЭ, хотя и не отражали математическую симметрию уравнений, содержащих напряженности магнитного и электрического полей. И это было не всегда понято некоторыми специальными электротехническими кафедрами.

Здесь проявило себя противоречие между физическим и математическим мышлением и различие отношений к классификации физиков и математиков, о котором говорил Максвелл.

В это время русская электротехническая литература пополнилась изданием американской книги Харнелла «Физические основы электротехники», переведенной под редакцией проф. К. М. Поливанова. В книге много внимания уделено Фарадею. Выход этой книги был омрачен директивными указаниями руководства, запретившего печатать имя иностранного автора на титуле книги. Она вышла просто под редакцией К. М. Поливанова, а ее автор при возражениях редактора был указан только в предисловии к книге.

Дальнейшее упорядочение терминов и определений, применяемых в электротехнике, нашло выражение в принятии общесоюзных стандартов в 1974 и 1981 гг. В настоящее время в МЭИ под руководством академика К. С. Демирчяна ведется большая работа по подготовке обновленной редакции проекта ГОСТ для широкого обсуждения заинтересованными организациями, согла-

сования с базовыми и специальными кафедрами вузов, внесения необходимых изменений.

Так же как Фарадей рассматривал во взаимосвязи все различные виды электричества, электротехническую подготовку специалистов необходимо рассматривать комплексно во взаимосвязи различных кафедр институтов. Следует рассмотреть три группы кафедр:

общенаучные — физика и высшая математика, включая вычислительную математику; инженерные, в числе которых базовой дисциплиной является ТОЭ;

профилирующие, в которых по каждой специальности имеются свои специальные курсы.

Каждая кафедра основывается на своем суверенитете, и их взаимное влияние определяется не всегда достаточно прочными связями; каждая борется за увеличение объема читаемых курсов, за усиление подготовки по своей специальности. При этом все заинтересованы в усиении подготовки по вычислительной технике.

Так как профилирующие кафедры обладают большей властью, то это сказывается на неуклонном перераспределении объема учебных часов с общей тенденцией уменьшения общенаучной и базовой подготовки. При снижении объема часов курса ТОЭ производится сокращение материала, излагаемого студентам, и, соответственно, из программы исключается все больше вопросов.

Первым этапом сокращения курса ТОЭ явилось изъятие физических основ электротехники на том основании, что эти вопросы достаточно хорошо изложены в курсе физики, а математическая подготовка по теории поля дает основание для отказа от рассмотрения силовых линий Фарадея, хорошо описанных векторами поля. Но зато понятию электротонического состояния, введенному Фарадеем в теории поля и описанному Максвеллом с помощью векторного потенциала, отводится определенное место, если только вся электродинамика не исключается из курса в связи с сокращением его объема.

Сейчас во многих вузах из двух разделов курса ТОЭ — «Теория цепей» и «Теория поля» остался только первый. Вопросам рассмотрения сил в электромагнитном поле практически совсем не уделяется внимания. Эти сокращения курса ТОЭ называют «оцепенением» и «обессиливанием». В то же время в специальных курсах, как, например, в теории электрических машин, все больше уделяется внимания теории электромагнитного поля и многие вопросы излагаются в отрыве от курсов физики и ТОЭ в достаточной мере своеобразно.

Ярким примером таких несогласованностей является дискуссия, ведущаяся на протяжении ряда лет в журнале «Электричество» между профессорами МЭИ Е. Л. Львовым и А. В. Ивановым-Смоленским при полном молчании кафедр ТОЭ и физики института, не высказавших своих суждений по принципиальному вопросу расчета сил, действующих в магнитном поле ферромагнетика. Только хороший физический эксперимент в традициях Фарадея может помочь раз-

решить этот спор, связанный с различным пониманием наследия Фарадея и Максвелла.

Обратимся теперь к проблемам, названным в заглавии сообщения. Какие сейчас стоят проблемы перед современной теоретической электротехникой? Назовем некоторые из них:

1. Важнейшей проблемой современности является поиск новых нетрадиционных источников электрической энергии. В физической литературе появляются сообщения о возможности использования энергии вакуума. В средствах массовой информации по этому вопросу изобилуют сенсационные сообщения, но о каких-либо исследованиях, свидетельствующих о технической возможности использования этого вида энергии, до сих пор не сообщается. В большинстве случаев эту информацию окружает занавес секретности. Здесь опять следует вспомнить Фарадея. Во всех его исследованиях он исходил из убежденности в возможности ожидаемого результата. Он добросовестно публиковал результаты всех своих экспериментов, не стесняясь писать о неудачах; упорно ставил новые опыты и настойчиво добивался результатов. Некоторые из таких исследований продолжались десятки лет. Во всех новых исследованиях Фарадей руководствовался нравственными принципами, полностью исключавшими возможность выдавать желаемое за действительное.

2. Изучение свойств и применение новых материалов и устройств электротехники и электроники, например: молекулярных накопителей энергии, сверхпроводящих материалов, новых нелинейных элементов, постоянных магнитов, сегнетоэлектриков и др. При этом остается проблемой дальнейшее изучение свойств таких старейших нелинейных элементов теории цепей и поля, как электрическая дуга и плазма.

3. Изучение хаотических случайных явлений в нелинейных электрических цепях и полях.

4. Широкое применение средств вычислительной техники в научных исследованиях и в обучении студентов.

5. Доведение до конца начатого еще Л. Р. Нейманом процесса обновления и упорядочения терминологии в области теоретической электротехники. При этом должна быть достигнута общая международная договоренность о единстве терминологии различных стран для всех электротехнических дисциплин — как общенаучных, так и профилирующих.

6. Установление более тесной связи с профилирующими кафедрами с целью полной преемственности изложения курсов и проведения совместных научных исследований по тематике специальностей.

7. Ведение непрерывной работы по научной

экспертизе и искоренению невежества в области электротехники.

Конечно, существуют и другие проблемы.

Вскоре после смерти Фарадея Максвелл писал о бедственном состоянии науки в Англии: «Состояние это таково, что в то время как растет число профессоров, растет число студентов, вводится практическое обучение и увеличивается количество учебников, растет количество и повышается квалификация лекторов-популяризаторов и авторов популярных научных книг — творческая исследовательская работа, источник благосостояния нации, падает». Максвелл делает вывод: «...нам нужны еще Фарадеи» и далее в цитате на 1,5 страницах приводит план председателя Британской ассоциации содействия прогрессу науки доктора Вильямсона, включающий такие проблемы, как отыскание наиболее одаренных природой юношей и создание условий, наиболее благоприятных для их успешной деятельности: «Они должны жить своей работой и не отвлекать своей энергией для других целей; они должны чувствовать себя обеспеченными от нужды на случай болезни или в старости. Им нужно дать способных и хорошо обученных ассистентов для помощи при исследовательских работах и предоставить им здания, аппаратуру и материалы, которые им понадобятся для успешного ведения этих исследований». Эти же проблемы стоят и перед современной теоретической электротехникой.

В заключение хотелось бы привести слова Яна Николаевича Шпильрейна, сказанные им на одной из лекций студентам более 50 лет тому назад: «Науку нужно любить! Как любят женщину! Но и любовь к женщине бывает разной: одни любят чистой бескорыстной, юношеской любовью, с первого взгляда до гробовой доски. Другие, как любят светскую Даму, связь с которой повышает престиж в обществе, а третьи, как богатую старуху, у которой хорошо быть на содержании».

Вся жизнь Майкла Фарадея является собой пример первой формы любви — безграничной любви к науке, стремления к познанию истины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максвелл Дж. К. Статьи и речи.— М.: Наука, 1968.
2. Академик Игорь Евгеньевич Тамм (сборник статей).— М.: Знание, 1982.
3. Шнейберг Я. А. Научный подвиг Майкла Фарадея.— Электричество, 1991, № 8.
4. Поливанов К. М. Развитие теоретической электротехники (Очерки по истории развития ТОЭ).— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1956.
5. Луи де Брайль. По тропам науки.— М.: Изд-во иностранной литературы, 1962.

## Фарадей и физика

*(доклад на конференции, посвященной 200-летию со дня рождения М. Фарадея)*

МИГУЛИН В. В.

Анализируя биографию великого Фарадея, хочется обратить внимание на то, что гениальный ученый почти все свои знания и мастерство приобрел за счет самообразования. Это обстоятельство, бесспорно, наложило свой отпечаток на его подход к решаемым им научным проблемам и на форму, в которой он фиксировал результаты своих исследований. Поразительная конкретность, ясность мыслей и глубина проникновения в изучаемые процессы и явления вместе с научной смелостью выводов характеризуют дошедшие до нас его записи, письма и сообщения. Практически не пользуясь математическим аппаратом, он в них раскрывает истинную природу изучаемых явлений, приводит к количественным соотношениям и дает то понимание действующих сил и процессов, которое лежит в основе современной физики макромира.

Работы Фарадея, его исследования и понимание окружающего нас мира явлений настолько естественно стали частью классической физики, что название данной статьи — «Фарадей и физика» — мне представляется не вполне удачным, так как не может быть физики без Фарадея. Говоря о работах Фарадея, мы говорим о соответствующих разделах физики, а говоря о физике, мы как бы воспроизводим его высказывания и приводим его результаты.

Нельзя умалять значение результатов, которые были получены до работ Фарадея. Работы Эрстеда, Араго, Ампера, Био, Савара, Волластона и других исследователей в области электрических и магнитных явлений, изученные ими эффекты и установленные соотношения также являются краеугольными камнями в соответствующих разделах физики. Но общий подход к пониманию, последовательное объяснение и уточнение ранее обнаруженных явлений придают работам Фарадея особое значение.

Не опираясь на предположение о дальнодействии магнитных и электрических сил, Фарадей последовательно изучает среду, в которой разыгрываются соответствующие явления. Он изучает ее свойства, ее поведение при наличии электрических зарядов и магнитов и первый разделяет вещества на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Вводя понятие «электротонического» состояния, создаваемого электрическими зарядами или токами в окружающей среде, Фарадей фактически формулирует понятие электрического поля. Тем самым он предлагает объяснить силы взаимодействия электрически заряженных тел воздействием на них со стороны среды, т. е. воздействием соответствующего поля на неподвижные или движущиеся заряды. Он не использует понятие эфира, но тем не менее считает, что даже пустое пространство должно обладать определенными свойствами, создаваемыми электрическими зарядами или магнитами.

Введя понятие линий сил или силовых линий, Фарадей как бы овеществил структуру магнитного или электрического полей. На этой основе он дал объяснения ряду явлений, рассмотренных им самим и другими исследователями; объяснения, которые больше не нуждаются ни в каких уточнениях.

Введенные Фарадеем представления о поле и силовых линиях позднее были блестяще использованы Максвеллом, который, дополнив эти основополагающие идеи гипотезой о токах смещения, построил свою завершенную теорию электромагнетизма, заключенную в классической системе уравнений. Справедливость же гипотезы о токах смещения и тем самым всей теории Фарадея — Максвелла была неопровергнуто доказана Герцем (1888 г.) и стала общепризнанной.

В физике, начиная с середины XIX в., нет сомнений в единственности понятия электричества. А до работ Фарадея очень широко было распространено представление о существовании нескольких типов электричества — вольтово обыкновенное, магнитоэлектричество, термоэлектричество, животное. Серией проведенных исследований и сопоставлением уже известных результатов экспериментов других исследователей Фарадей в своей работе — «Идентичность электричеств, получаемых из различных источников» — однозначно показал единую природу различных «электричеств» и попутно ввел в обиход физики понятие силы тока, напряжения и количества электричества, указав пути определения и измерения этих величин (1833 г.).

В настоящем сообщении не имеет смысла последовательно перечислять и пояснять все важнейшие результаты исследований Фарадея. Мне представляется необходимым отметить здесь лишь обобщенно вклад Фарадея, упомянув только принципиальные положения, следующие из его работ.

Одно из важнейших открытий Фарадея — открытие электромагнитной индукции — заслуживает особого упоминания. В этом эффекте Фарадей увидел и показал всем занимающимся физикой, что электромагнитная индукция — динамический процесс и только в динамике взаимодействия магнитного поля с электрическими зарядами движущихся проводников или наоборот неподвижных проводников с движущимся магнитным полем возможно получение динамического процесса — электрического тока. Это не статика, как в случае электростатической индукции, и Фарадей понимал, что работа, затрачиваемая на взаимное перемещение магнитного поля (магнита) и проводника, создает электрический ток, несущий определенную энергию (силу в его терминологии). Также и в своих последующих работах Фарадей обращает внимание на то, что получение электрического тока требует затраты энергии (например, энергии хими-

ческих реакций в батарее, поддержание разности температур в термоэлементах).

Изучая прохождение электрического тока через различные вещества, Фарадей открыл основные законы электролиза и показал принципиальное различие механизмов проводимости в металлах и в электролите. Им было введено понятие электрохимического эквивалента и дан метод определения количества электричества по количеству жидкости, разложенной в ходе электролиза. Отметим, что термины: анод, катод, электролиз, электролит — также были введены Фарадеем.

Рассматривая действие электрического тока и произведенную им работу на нагрев, перемещение, электролиз или другие процессы, Фарадей показывает, что работа, производимая током, обязательно должна компенсироваться «вложением» энергии со стороны других частей электрической цепи. В своих экспериментах, где источником тока являлись гальванические элементы, Фарадей считает, что источником энергии являются химические реакции, происходящие в этих элементах, и что постоянно должен иметь место баланс между расходуемой и создаваемой энергией (силой по его терминологии). Тем самым Фарадей высказал положение, которое в дальнейшем было уточнено Ф. Мором, Р. Майером, Джоулем и Гельмгольцем.

Необходимо также обратить внимание на еще одно фундаментальное открытие Фарадея — на обнаружение воздействия магнитного поля на свет. И здесь Фарадей опять показал роль среды, в которой происходит взаимодействие света и магнитного поля. Открытое Фарадеем враще-

ние плоскости поляризации поляризованного света при его распространении в определенном веществе вдоль направления магнитных силовых линий стало событием исключительного значения. Оно впервые продемонстрировало связь оптических явлений с магнетизмом, а значит и с электромагнитными процессами.

Следует отметить также, что в записях Фарадея есть указания на проведенные им опыты, поставленные с целью поиска воздействия магнитного поля на свет в процессе его испускания. Здесь также проявилась позиция Фарадея — искать связи различных сил и процессов обязательно в их взаимодействиях с веществом. Не рассматривать свет, электричество, магнетизм как некие самостоятельные субстанции, а исследовать их взаимодействие лишь через динамические или статические состояния соответствующей среды. Однако отсутствие достаточно чувствительных приборов и устройств не позволило Фарадею обнаружить этот эффект, который позднее был открыт Зееманом.

И в заключение хотелось бы отметить следующее. В № 2 журнала «Вестник Академии наук СССР» за 1991 г. опубликована отличная статья В. П. Лишевского о жизни Фарадея, его достижениях и его роли в науке. Но мне кажется, что ее название — «Чернорабочий науки» — не совсем удачно. Фарадей был величайшим тружеником и творцом, а не чернорабочим, выполнившим черновую работу по заданному ему плану.

[30.10.91]

УДК 537.321:621.315.55.016.4.001.24

## Расчет процесса энерговыделения в цилиндрических токопроводах электрофизических установок высокого напряжения

БАРАНОВ М. И., канд. техн. наук

Харьковский политехнический институт

В целях создания электрофизических установок (ЭФУ) высокого напряжения с емкостными накопителями энергии (ЕНЭ) при анализе переходных процессов в их разрядных цепях возникает необходимость в расчете выделения энергии в отдельных токоведущих частях ЭФУ [1, 2]. В связи с тем, что в ЭФУ с ЕНЭ применяются токопроводы различной формы (плоские, цилиндрические) и толщины (от долей до десятков миллиметров) и, как правило, с неравномерным распределением по их поперечному сечению импульсного тока, амплитудно-временные

параметры которого изменяются в достаточно широких пределах, то решение данной задачи связано с определенными трудностями.

В [3] приведен метод расчета в стационарном режиме тепловых потерь в массивном трубчатом проводнике прямоугольного сечения, находящемся в электромагнитном поле высокой частоты. При этом, однако, для вычисления потерь необходимо знать значение тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности трубчатого идеального проводника, что является предметом отдельного исследования. В [4] при-

менительно к микроволновой технике рассмотрен метод расчета тепловых потерь в одиночном плоском проводнике прямоугольного сечения, основанный на вариационной формулировке задачи квазистационарного поверхностного эффекта на высоких частотах. При этом было показано, что при толщинах плоского проводника, соизмеримых с толщиной скин-слоя, расчет выделяющейся в нем энергии на основе приближенного метода, изложенного в [5] и справедливого для массивного проводника, приводит к недостоверным результатам.

При известных операторных выражениях для сопротивления массивного проводника и тока в разрядной цепи ЭФУ с ЕНЭ наиболее предпочтительным методом определения энергии, выделяемой в массивных проводниках с импульсным магнитным полем, является аналитический, основанный на применении теоремы Парсеваля [6]. В случае, когда форма воздействующего на проводник импульса тока заранее неизвестна, эффективным способом определения выделяющейся энергии в массивных токопроводящих элементах цепи ЭФУ с сосредоточенными параметрами является использование формулы Парсеваля в соответствии с [7].

В настоящее время отсутствуют данные по расчету в импульсном режиме энергии, выделяемой в проводниках, толщина которых соизмерима или меньше глубины проникновения в них электромагнитного поля, что является весьма распространенным на практике случаем (например, при применении в разрядной цепи ЭФУ с ЕНЭ цилиндрической ошиновки на базе коаксиального кабеля типов РК и КПВ или плоской ошиновки из фольгированного стеклотекстолита типа СФ). Кроме того, для практических расчетов энергетического баланса в разрядной цепи ЭФУ с ЕНЭ, оптимизационных расчетов, связанных с увеличением доли энергии, выделяемой в нагрузке, и определения допустимых температур нагрева их изолированных токопроводов актуальным является получение достаточно простых по структуре формул и алгоритмов для анализа процесса энерговыделения в цилиндрических проводниках с произвольной толщиной стенки.

Целью данной статьи является разработка методики приближенного численного расчета энергии, выделяющейся в немагнитных сплошном и трубчатом цилиндрических токопроводах произвольной толщины с сосредоточенными параметрами при воздействии на них импульсного аксиального тока, изменяющегося во времени по закону экспоненциально затухающей синусоиды, и апериодического двухэкспоненциального импульса тока. Рассматриваемые законы изменения разрядного тока ЭФУ чаще других встречаются на практике и имеют важное прикладное значение в импульсной технике высоких напряжений [1, 2]. Следует отметить, что в [2] для определения электрического, термического и механического воздействия тока молнии на токоведущие части оборудования, прежде всего грозозащитного, рекомендовано испытывать их в ЭФУ апериодическими импульсами тока экспоненциальной фор-

мы. При расчетах выделения энергии в рассматриваемых цилиндрических токопроводах разрядной цепи ЭФУ с сосредоточенными параметрами воспользуемся классическим методом, основанным на законе Джоуля — Ленца [8]. Условимся, что используемые в дальнейших расчетах основные допущения аналогичны принятым в [9, 10]. Отметим, что при расчете и анализе нестационарных электромагнитных процессов в ЭФУ с учетом выделяющейся энергии в проводниках их разрядной цепи предпочтительнее и удобнее пользоваться усредненными за определенный промежуток времени значениями активного сопротивления, индуктивности, мощности тепловых потерь и энергии магнитного поля [9, 11].

**Воздействие синусоидального импульса тока.** В этом случае выражение для импульсного тока, действующего на включенный в разрядную цепь ЭФУ с ЕНЭ цилиндрический токопровод, принимает вид:

$$i_1(t) = \beta_1 I_{m1} \exp(-\delta t) \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $I_{m1}$  — максимальное значение синусоидального тока;  $\delta, \omega$  — соответственно коэффициент затухания и частота изменения тока;  $t$  — текущее значение времени;  $\beta_1 = [\exp(-\frac{\delta}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{\delta}{\omega}) \times$

$\times \sin(\operatorname{arctg} \frac{\delta}{\omega})]^{-1}$  — нормирующий множитель (при  $\delta/\omega=0, \beta=1$ ).

В соответствии с законом Джоуля — Ленца в импульсном режиме для усредненной на произвольном временном отрезке  $[t_1, t_2]$  мощности тепловых потерь в сплошном и трубчатом цилиндрических токопроводах произвольной толщины при заданном законе (1) изменения разрядного тока ЭФУ получаем

$$P_i(\varphi) = \frac{2\pi\gamma_i l_i}{\varphi_k - \varphi_n} \int_{\varphi_n}^{\varphi_k} \int_{a_i}^b E_{zi}^2(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (2)$$

где  $E_{zi}(r, \varphi)$  — значение напряженности нестационарного аксиального электрического поля в материале сплошного ( $i=1$ ) и трубчатого ( $i=2$ ) токопроводов;  $\gamma_i = \gamma_{oi}(1 + \Theta_i)$  — удельная электропроводность материала токопроводов;  $\Theta_i^* = \Theta_i / \Theta_{bi}$ ;  $\Theta_i = \Theta_{ti} - \Theta_{0i}$  — повышение температуры материала токопроводов;  $\Theta_{0i}$  и  $\Theta_{ti}$  — соответственно температура материала токопроводов до и в процессе воздействия импульса тока;  $\Theta_{bi} = 1/c_{vi} \times \beta_{ti}$ ;  $c_{vi}$  — удельная объемная теплоемкость материала токопроводов;  $\beta_{ti}$  — тепловой коэффициент удельной электропроводности материала токопроводов;  $\gamma_{oi}$  — удельная электропроводность материала токопроводов при  $\Theta_i=0$ ;  $l_i$ ,  $b$ ,  $r$  — соответственно длина, наружный и текущий радиусы токопроводов;  $\varphi = \omega t$ ;  $\varphi_n = \omega t_n$ ;  $\varphi_k = \omega t_k$ ;  $a_1 = 0$ ;  $a_2 = a$ .

В случае линейной диффузии поля с учетом (2) и известных результатов расчета нестационарного поверхностного эффекта в цилиндрических токопроводах произвольной толщины при воздействии на них импульса аксиального тока

(1) [2] выражение для энергии  $W_i(\varphi) = P_i(\varphi) \times (\tau_k - t_u)$ , выделяющейся в цилиндрических токопроводах ЭФУ за отрезок времени  $[t_u, \tau_k]$ , можно представить в следующем безразмерном виде:

для сплошного токопровода

$$W_1^*(\varphi) = \frac{2}{\varphi_k - \varphi_u} \int_{\varphi_u}^{\varphi_k} \int_0^1 A_1^2(r^*, \varphi) r^* dr^* d\varphi; \quad (3)$$

для трубчатого токопровода

$$W_2^* = \frac{2(\alpha^2 - 1)}{\varphi_k - \varphi_u} \int_{\varphi_u}^{\varphi_k} \int_{\alpha^{-1}}^1 A_2^2(r^*, \varphi) r^* dr^* d\varphi, \quad (4)$$

где  $W_1^*(\varphi) = \frac{W_1(\varphi)}{W_{01}}$ ;  $W_2^*(\varphi) = \frac{W_2(\varphi)}{W_{02}}$ ;  $W_{01} = \frac{\beta_1^2 I_{m1}^2 l_1}{\pi b^2 \gamma_1} \times$   
 $\times (\tau_k - t_u)$  — выделяемая энергия в сплошном токопроводе при постоянном токе, равном  $\beta_1 I_{m1}$ ;  $W_{02} = \frac{\alpha^2 \beta_1^2 I_{m1}^2 l_2(\tau_k - t_u)}{\pi b^2 (\alpha^2 - 1) \gamma_2}$  — выделяемая энергия в трубчатом токопроводе при постоянном токе, равном  $\beta_1 I_{m1}$ ;  $\alpha = b/a$ ;  $r^* = r/b$ ;  $A_1(r^*, \varphi)$  и  $A_2(r^*, \varphi)$  — безразмерные функции, характеризующие в импульсном режиме изменения напряженностей аксиального электрического поля в цилиндрических токопроводах при воздействии импульса тока (1) [9].

**Воздействие апериодического импульса тока.** Выражение для импульса тока, протекающего при этом по цилиндрическим токопроводам ЭФУ, запишем в виде:

$$i_2(t) = \beta_2 I_{m2} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (5)$$

где  $I_{m2}$  — амплитуда апериодического импульса тока;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — коэффициенты формы импульса тока ( $\alpha_1 \approx 0,76/\tau_u$ ,  $\alpha_2 \approx 2,37/\tau_\phi$ );  $\tau_\phi$ ,  $\tau_u$  — длительность фронта и длительность апериодического импульса тока, определяемые соответственно между уровнями 0,1—0,9 и на уровне 0,5 от его амплитуды;  $\beta_2 = [(\alpha_1/\alpha_2)^{\alpha_1/(\alpha_2 - \alpha_1)} - (\alpha_1/\alpha_2)^{\alpha_2/(\alpha_2 - \alpha_1)}]^{-1}$  — нормирующий множитель.

Используя формулы (2) — (4) и принимая во внимание полученные в [10] для  $\gamma_i = \gamma_{0i}$  результаты расчета нестационарного поверхностного эффекта в цилиндрических токопроводах произвольной толщины при принятом законе (5) изменения апериодического импульса тока, для энергии  $W_i(t^*) = P_i(t^*) \tau_u$ , выделяющейся в токопроводах за время, равное длительности апериодического импульса тока  $\tau_u$ , получаем следующие безразмерные выражения:

для сплошного токопровода

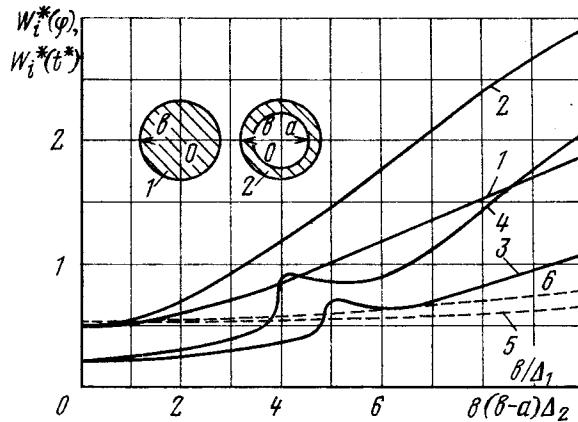
$$W_1^*(t^*) = \frac{2}{\tau_u^*} \int_0^{\tau_u^*} \int_0^1 A_1^2(r^*, t^*) r^* dr^* dt^*; \quad (6)$$

для трубчатого токопровода

$$W_2^*(t^*) = \frac{2(\alpha^2 - 1)}{\tau_u^*} \int_0^{\tau_u^*} \int_{\alpha^{-1}}^1 A_2^2(r^*, t^*) r^* dr^* dt^*, \quad (7)$$

где  $W_1^*(t^*) = \frac{W_1(t^*)}{W_{01}}$ ;  $W_2^*(t^*) = \frac{W_2(t^*)}{W_{02}}$ ;  $W_{01} = \frac{\beta_1^2 I_{m2}^2 l_1 \tau_u}{\pi b^2 \gamma_1}$  — выделяемая энергия в сплошном токопроводе при постоянном токе, равном  $\beta_1 I_{m2}$ ;  $W_{02} = \frac{\alpha^2 \beta_1^2 I_{m2}^2 l_2 \tau_u}{\pi b^2 (\alpha^2 - 1) \gamma_2}$  — выделяемая энергия в трубчатом токопроводе при постоянном токе, равном  $\beta_1 I_{m2}$ ;  $\tau_u^* = \tau_u/t_6$ ;  $t^* = t/t_6$ ;  $t_6$  — базисная величина для времени  $t$ ;  $A_1(r^*, t^*)$ ,  $A_2(r^*, t^*)$  — безразмерные функции, характеризующие в импульсном режиме изменения напряженностей аксиального электрического поля в цилиндрических токопроводах при воздействии импульса тока (5) [10].

**Анализ численных результатов расчета.** На рисунке приведены результаты численных расчетов по формулам (3), (4), (6) и (7) (с использованием данных [10, 12]) нормированных значений выделяемой энергии  $W_i^*(\varphi)$  и  $W_i^*(t^*)$  в цилиндрических токопроводах ЭФУ в зависимости от их относительных толщин  $b/\Delta_1$  и  $(b-a)/\Delta_2$ , где  $\Delta_i$  — толщина скин-слоя. Сплошными кривыми изображены зависимости  $W_i^*(\varphi)$  для первого полупериода колебаний ( $\varphi_u=0$ ;  $\varphi_k=\pi$ ) синусоидального импульса тока по выражению (1) при  $\delta/\omega=0$  и  $\delta/\omega=0,3$ , а пунктирными — зависимости  $W_i^*(t^*)$  для апериодического импульса тока по (5) при отношении временных параметров  $\tau_\phi/\tau_u=2/50$  мкс. При данном отношении  $\tau_\phi/\tau_u$  рассматриваемый апериодический импульс тока по форме соответствует току, воспроизведенному в ЭФУ, предназначенным для имитации главного разряда тока молний в лабораторных условиях [13, 14]. Расчеты  $W_i^*(\varphi)$  и  $W_i^*(t^*)$  были выполнены на ЭЦВМ ЕС-1061 при следующих значениях безразмерных и базисных величин:  $\alpha_1^* = \alpha_1 t_6 = 3,058 \cdot 10^{-2}$ ;  $\alpha_2^* = \alpha_2 t_6 = 2,377$ ;  $t_u^* = 25$ ;  $t_6 = \tau_\phi = 2 \cdot 10^{-6}$  с. Параметр  $\alpha$  для трубчатого токопровода варьировался в пределах 1,05—2,0, а значения относительной толщины скин-слоя  $\Delta_i^* = \Delta_i/b$  изменялись в диапазоне 0,01—5,0. Заметим, что значения  $\Delta_i^*$  при токовом воздействии (1) определялись из соотношения  $\Delta_i^* = \sqrt{2/\omega \cdot \mu_0 \gamma_i b^2}$ , а при токовом воздействии (5) — из соотношения  $\Delta_i^* = \sqrt{\tau_\phi/0,4 \cdot \mu_0 \gamma_i b^2}$ . При интегрировании в (3), (4), (6) и (7) безразмерные функции  $A_1(r^*, \varphi)$  и  $A_2(r^*, \varphi)$  ограничивались 20 членами ряда, а безразмерные функции  $A_3(r^*, t^*)$  и  $A_4(r^*, t^*)$  — 100 членами ряда. При таком выборе числа членов в рассматриваемых рядах погрешность расчета  $W_i^*(\varphi)$  и  $W_i^*(t^*)$  составляет существенно менее 1 %. Затраты машинного времени на один из вариантов расчетов по  $b/\Delta_1$  или  $(b-a)/\Delta_2$  для немассивных токопроводов при абсолютной и относительной погрешности вычисления интегралов в (3), (4), (6) и (7) не более 0,001 в случае воздействия синусоидального импульса тока (1) составляют в среднем примерно 1 мин, а в случае воздействия апериодического импульса тока (5) — примерно 20 мин. Следует отметить, что при этом затраты процессорного времени на вычисления подынтегральных функций в (3), (4),



Нормированные значения выделяемой энергии в сплошном (1) и трубчатом (2) цилиндрических токопроводах ЭФУ при воздействии на них экспоненциально затухающего синусоидального  $W_i^*(\phi)$  и апериодического двухэкспоненциального  $W_i^*(t^*)$  импульсов тока в зависимости от относительных толщин токопроводов  $b/\Delta_1$  и  $(b-a)/\Delta_2$ : 1—4 —  $W_i^*(\phi)$ ; 5, 6 —  $W_i^*(t^*)$ ; 1, 2 —  $\delta/\omega=0$ ; 3, 4 —  $\delta/\omega=0.3$ ; 5, 6 —  $\tau_\phi/\tau_n=2/50$  мкс

(6) и (7) несоизмеримо малы по сравнению с общими затратами времени.

Из приведенных на рисунке зависимостей следует, что как для синусоидального (1), так и для апериодического (5) импульсов тока при увеличении относительных толщин  $b/\Delta_1$  и  $(b-a)/\Delta_2$  сплошного и трубчатого токопроводов ЭФУ выделяемые в них значения энергии  $W_i^*(\phi)$  и  $W_i^*(t^*)$ , нормированные относительно энергии тепловых потерь при постоянном токе, возрастают. Причем для трубчатого токопровода (кривые 2, 4 и 6) скорость нарастания рассматриваемых значений энергии больше, чем для сплошного токопровода (кривые 1, 3 и 5), а изменение значений для  $W_i^*(\phi)$  происходит значительно быстрее, чем для  $W_i^*(t^*)$ . Для незатухающего синусоидального тока ( $\delta/\omega=0$ ) на участке его первого полупериода ( $\phi \in [0, \pi]$ ) при  $b/\Delta_1 \geq 4,9$  для сплошного и при  $(b-a)/\Delta_2 \geq 3,3$  для трубчатого токопроводов значения  $W_i^*(\phi)$  и  $W_i^*(t^*)$  становятся больше единицы. При  $b/\Delta_1 = (b-a)/\Delta_2 = 10,0$  значения  $W_i^*(\phi)$  и  $W_i^*(t^*)$  достигают соответственно 1,866 и 2,878, а значения  $W_i^*(t^*)$  и  $W_i^*(t^*)$  — 0,654 и 0,772.

При  $b/\Delta_1$  и  $(b-a)/\Delta_2 \gg 1$  влияние нестационарного поверхностного эффекта на значения рассеиваемой энергии  $W_i^*(\phi)$  и  $W_i^*(t^*)$  на активном сопротивлении цилиндрических токопроводов ЭФУ существенно возрастает, что подтверждается данными, приведенными в табл. 1. Согласно зависимостям на рисунке при  $b/\Delta_1$  и  $(b-a)/\Delta_2 = 1,0$   $W_i^*(\phi) = 0,509$  и  $W_i^*(t^*) = 0,524$ , а при  $b/\Delta_1$  и  $(b-a)/\Delta_2 \rightarrow 0$   $W_i^*(\phi) \rightarrow 0,5$  и  $W_i^*(t^*) \rightarrow 0,524$ , т. е. для цилиндрических токопроводов разрядной цепи ЭФУ с ЕНЭ, толщина которых соизмерима с толщиной скин-слоя или меньше ее, нормированные значения энергии для первого полупериода колебаний незатухающего ( $\delta/\omega=0$ ) синусоидального (1) и апериодического (5) импульсов тока практически вдвое меньше соответствую-

Таблица 1

Отношение $(b-a)/\Delta_2$	Нормированные значения выделяемой энергии $W_i^*(\phi)$ и $W_i^*(t^*)$ в трубчатом токопроводе ЭФУ	
	для первого полупериода синусоидального импульса тока (1) при $\delta/\omega=0$	для апериодического импульса тока (5) при $\tau_\phi/\tau_n=2/50$ мкс
10,0	2,878	0,772
33,3	18,51	2,234
41,1	25,84	2,520
50,0	34,47	2,742

щих значений энергии, выделяемой в них при постоянном токе.

При  $\delta/\omega \neq 0$  на кривых для  $W_i^*(\phi)$  появляются локальные максимумы. Для  $\delta/\omega=0,3$  эти максимумы проявляются при  $b/\Delta_1 \approx 5,0$  для сплошного и при  $(b-a)/\Delta_2 \approx 4,0$  для трубчатого токопроводов (кривые 3 и 4), что согласуется с выявленными ранее соответствующими изменениями усредненных значений активных сопротивлений рассматриваемых токопроводов в импульсном режиме [9]. Затухание синусоидального тока (1) при этом вызывает соответствующее уменьшение значений  $W_i^*(\phi)$ , стремящихся к 0,206 при  $b/\Delta_1$  и  $(b-a)/\Delta_2 \rightarrow 0$  и  $\delta/\omega=0,3$ . При неограниченном возрастании отношения  $\delta/\omega$   $W_i^*(\phi) \rightarrow 0$ , что совпадает с результатами, приведенными в [11] для плоского массивного проводника. Описанные выше зависимости  $W_i^*(\phi)$  получены для первого полупериода колебаний затухающего по синусоидальному импульсу тока (1).

Проведенные расчеты  $W_i^*(\phi)$  для последующих полупериодов импульсного тока (1) показали, что при  $\delta/\omega=0$  на участке второго полупериода ( $\phi \in [\pi, 2\pi]$ ) нормированные значения энергии, выделяемой в цилиндрических токопроводах произвольной толщины, достигают своих максимальных значений. Из данных, приведенных в табл. 2 и 3, следует, что для массивных токо-

Таблица 2

Отношение $b/\Delta_1$	Нормированные значения выделяемой энергии $W_i^*(\phi)$ в сплошном токопроводе ЭФУ для синусоидального импульса тока (1) при $\delta/\omega=0$		
	на участке первого полупериода	на участке второго полупериода	на участке третьего полупериода
10,0	1,866	2,860	2,525
20,0	3,572	5,584	4,987
100,0	13,36	20,76	17,39

Таблица 3

Отношение $(b-a)/\Delta_2$	Нормированные значения выделяемой энергии $W_i^*(\phi)$ в трубчатом токопроводе ЭФУ для синусоидального импульса тока (1) при $\delta/\omega=0$		
	на участке первого полупериода	на участке второго полупериода	на участке третьего полупериода
1,0	0,524	0,529	0,529
5,0	1,448	2,093	1,846
10,0	2,878	4,231	3,693

проводов ( $b/\Delta_1$ ,  $(b-a)/\Delta_2 \gg 1$ ) при  $b/\Delta_1 = (b-a)/\Delta_2 = 10,0$  значения  $W_i^*(\phi)$  и  $W_2^*(\phi)$ , вычисленные на участке второго полупериода, по сравнению с первым полупериодом увеличиваются соответственно примерно на 53 и 47 %. На участках третьего ( $\phi \in [2\pi, 3\pi]$ ) и последующих полупериодов незатухающего синусоидального тока (1) эти расхождения в значениях  $W_i^*(\phi)$  уменьшаются и асимптотически приближаются к соответствующим установившимся значениям. Эти результаты для  $W_i^*(\phi)$  согласуются с известными данными, полученными для случая импульсного воздействия тока (1) на плоский массивный проводник [11]. Для немассивных токопроводов ( $b/\Delta_1, (b-a)/\Delta_2 < 10$ ) различия в значениях  $W_i^*(\phi)$  в зависимости от номера полупериода тока (1) существенно уменьшаются и при  $b/\Delta_1 = (b-a)/\Delta_2 \leq 1,0$  не превышают 1 % (см. табл. 3), что объясняется заметным ослаблением влияния нестационарного поверхностного эффекта на протекающие внутри немассивных цилиндрических токопроводов электромагнитные процессы.

**Выводы.** 1. Приведенная методика приближенного численного расчета энергии, выделяющейся в немагнитных сплошном и трубчатом цилиндрических токопроводах произвольной толщины при воздействии импульсного тока, изменяющегося во времени по законам (1) и (5), позволяет учесть влияние нестационарного поверхностного эффекта в них на импульсное тепловыделение в цилиндрической ошиновке разрядной цепи ЭФУ с сосредоточенными параметрами.

2. Установлено, что в импульсном режиме для массивных сплошного ( $b/\Delta_1 \gg 1$ ) и трубчатого [ $(b-a)/\Delta_2 \gg 1$ ] цилиндрических токопроводов ЭФУ выделяемая в них энергия как для экспоненциально затухающего синусоидального  $W_i(\phi)$ , так и апериодического двухэкспоненциального  $W_i(t^*)$  импульсов тока существенно превышает соответствующие значения выделяющей-

ся в них энергии при постоянном токе  $W_{0i}$ , а для немассивных токопроводов, толщина которых соизмерима с толщиной скин-слоя или меньше ее, справедливы соотношения  $W_i(\phi) \leq 0,5 W_{0i}$  и  $W_i(t^*) \approx 0,524 W_{0i}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под общ. ред. В. С. Комелькова.— М.: Атомиздат, 1970.
2. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / М. Байер, В. Бёк, К. Мёллер, В. Цаенгль; Пер. с нем. Под ред. В. П. Ларионова.— М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Рытов С. М. К расчету поглощения электромагнитных волн в трубах.— Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1940, т. 10, № 2.
4. Waldow P., Wolff I. The skin-effect at high frequencies.— IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1985, vol. MTT-33, N 10, pp. 1076—1082.
5. Wheeler H. A. Formulas for the skin-effect.— Proc. IRE, 1942, vol. 30, pp. 412—424.
6. Миэринь М. А., Новгородцев А. Б. Аналитический метод определения энергии, выделяемой в массивных проводниках в импульсном магнитном поле.— Электричество, 1988, № 12.
7. Миэринь М. А., Новгородцев А. Б. Анализ энергетических соотношений в контурах с индуктивными связями при переходных процессах.— Электричество, 1987, № 3.
8. Тамм И. Е. Основы теории электричества.— М.: Наука, 1976.
9. Баранов М. И., Бондина Н. Н. Расчет активного сопротивления и индуктивности цилиндрического проводника с импульсным током.— Электричество, 1990, № 1.
10. Баранов М. И., Бондина Н. Н. Нестационарный поверхностный эффект в цилиндрических токопроводах с гро-зовым импульсом тока.— Электричество, 1990, № 2.
11. Бондалетов В. Н. Эквивалентные параметры при нестационарном распространении импульсного электромагнитного поля в проводнике.— Электричество, 1975, № 8.
12. Баринов М. И., Белый И. В., Хименко Л. Т. Поверхностный эффект и распределение электродинамических усилий в цилиндрических токопроводах коаксиальной системы с импульсным током.— Электричество, 1976, № 10.
13. Feser K., Modrusan M., Sutter H. Simulation of multiple lightning strokes in laboratory.— 3-rd Int. Symp. on High Voltage Engineering, Milan, 1979, Rep. 41.05.
14. Кравченко В. И., Болотов Е. А., Летунова Н. И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи.— М.: Радио и связь, 1987.

[29.01.91]

# Зависимость удельного электрического сопротивления грунта от напряженности электрического поля

АННЕНКОВ В. З., БЕЛЯКОВ А. П., ВЕРЕЩИНСКИЙ С. Ю.

**Введение.** Грунт, как известно, является сложной гетерогенной средой, содержащей твердые вещества, воздух и электролиты — водные растворы солей, кислот и щелочей. Именно благодаря электролитам грунт обладает электрической проводимостью, так как твердые вещества (в том числе и гумус) и воздух неэлектропроводны.

Одним из основных понятий теории и практики заземлений является удельное электрическое сопротивление грунта — отношение напряженности электрического поля в земле к плотности тока, которое считается неизменным. Удельное электрическое сопротивление грунта обычно определяется при токе промышленной частоты и небольшом напряжении испытательной установки. При этом точно не устанавливается, каким должен быть ток, однако подразумевается, что должна сохраняться пропорциональность между напряженностью электрического поля и плотностью тока в земле, т. е. должен соблюдаться закон Ома. Известно, что Ом вывел свой закон для металлических проводников. В жидкостях же проводниками электрического тока являются ионы. При постоянной температуре в жидкостях происходят одновременно процесс диссоциации молекул на ионы и процесс рекомбинации ионов в молекулы. Ионы, как и молекулы, в отсутствие тока находятся в беспорядочном движении. Каждый ион окружен ионной атмосферой из ионов, заряды которых имеют знак, противоположный знаку заряда центрального иона. Эта ионная атмосфера образуется при каждом положении иона в процессе его хаотического теплового движения, а затем вновь разрушается [1]. Подвижность различных ионов (за исключением ионов водорода и гидроксила OH) почти одинакова несмотря на различные массы, радиусы ионов и заряды. Представляется, что это имеет важное значение для объяснения физической сущности происходящих процессов.

Кроме указанной структуры, каждый ион поляризует находящиеся вблизи него молекулы воды и притягивает их к себе, вследствие чего вокруг иона и ионной атмосферы образуется оболочка из молекул, перемещающаяся в дальнейшем вместе с ионом. Размеры этой оболочки велики по сравнению с размерами иона. Радиус гидратированного иона зависит не от знака заряда, а от его абсолютной величины. Гидратная оболочка настолько непрочна, что, например, можно наблюдать изменение сопротивления электролитов в зависимости от частоты, особенно при высоких частотах.

Ранее было установлено [2], что при кратковременных импульсах тока электропроводность электролитов растет с увеличением напряженности электрического поля. При этом электропроводность растворов вначале увеличивалась медленно, затем, при большой напряженности элект-

рического поля, быстрее и, наконец, при еще более высоких напряженностях поля, достигала некоторого предела. Проведенные затем расчеты и дополнительные эксперименты подтвердили наблюдения [2].

Влажность грунтов, как известно, изменяется в широких пределах, что соответствует изменению в широких пределах концентрации водного электролита грунта.

Применительно к сильным электролитам описанный в [2] эффект Вина объясняется на основе теории Дебая — Онзагера [3]. Если в жидкости создается электрическое поле, то ионы получают добавочную скорость — в направлении поля или против него. Подвижность (скорость) ионов растет прямо пропорционально напряженности электрического поля  $E$ :

$$v = \frac{ze}{K_t} E, \quad (1)$$

где  $z$  — валентность иона;  $K_t$  — коэффициент внутреннего трения раствора;  $e$  — заряд иона.

В (1) коэффициент  $K_t$  может быть переменной величиной при изменении  $E$  из-за изменения количества ионов другого знака вокруг центрального иона, а также из-за изменения числа и структуры гидратированных молекул.

Время создания или размещения ионной атмосферы вокруг центрального иона, т. е. время релаксации, например, для 1—1-валентного раствора хлористого натрия, приближенно подсчитывается по формуле

$$\tau = \frac{10^{-10}}{C} \text{ (с),} \quad (2)$$

где  $C$  — концентрация электролита  $(\frac{\text{г}}{\text{л}})$ .

При увеличении напряженности электрического поля в электролите в соответствии с уравнением (1) растет скорость движения иона, а следовательно, возрастает и путь, пройденный ионом за время релаксации. В этих условиях ион в конце концов выйдет за пределы ионной атмосферы. Поэтому тормозящий эффект ионной атмосферы уменьшится по сравнению со случаем, когда напряженность электрического поля сравнительно мала.

Напряженность электрического поля, после которой сопротивление раствора  $R$  перестает быть неизменной величиной и начинает сказываться эффект Вина, в жидкостях определяется формулой:

$$E_n = 4 \cdot 10^5 \sqrt{C}. \quad (3)$$

Таким образом, по формуле (3) при  $C=0,001$  для нормального 1—1-валентного раствора электролита, что вполне приемлемо для грунтов, эффект Вина начнет проявляться при напряженности  $1,2 \cdot 10^4$  В/м или при  $E_n \geq E_n = 12$  кВ/м.

Превышение напряженностью электрического поля величины  $E_n$  приведет к тому, что ионная атмосфера вокруг центрального иона будет образовываться не полностью, в результате чего закон Ома не будет соблюдаться. При дальнейшем увеличении напряженности ионная атмосфера вокруг иона не будет образовываться, и исчезнут все связанные с ней тормозящие эффекты (электрофоретический, характеризуемый коэффициентом  $K_n$  и релаксационный). При этом нелинейное увеличение плотности тока должно прекратиться.

Влияние напряженности электрического поля на электропроводность слабых электролитов, где эффект Вина был сильнее, связано с изменением степени электролитической диссоциации под действием приложенного поля. Онзагер показал, что скорость диссоциации слабых электролитов увеличивается с ростом напряженности поля, а скорость рекомбинации от него не зависит; в результате степень диссоциации должна расти, как определил опытным путем Вин.

При исследовании заземлителей [4—6] было установлено, что их сопротивление зависит от стекающего с них тока. Вольт-амперные характеристики различных грунтов в однородном поле [7] показывают, что существенной нелинейностью обладают, в основном, глинистые грунты, а нелинейностью песчаных грунтов можно пренебречь.

Несмотря на сложную структуру и состав, все типы грунтов (песчаные, перегнойные, глинистые), а также вода при грозовых импульсных воздействиях имеют вольт-амперные характеристики, описываемые показательными функциями, начиная с некоторого значения напряженности  $E_n$  и до пробоя грунта [8]:

$$E = AJ^\beta \quad (4)$$

где  $J$  — плотность тока;  $A$  и  $\beta$  — соответственно коэффициенты пропорциональности и нелинейности.

Из формулы (4) при  $\beta=1$  получаем закон Ома:

$$E = qJ, \quad (5)$$

где  $q=A$ .

Размерность коэффициента  $A$  в (4) может быть различной: [Ом·м] при  $\beta=1$  и [В/м] при  $\beta=0$ . Можно утверждать, что этот коэффициент выражается в единицах системы СИ. Коэффициент  $\beta$  — безразмерная величина.

Напряженность  $E_n$  в [8] названа начальной. Ее значение при увеличении времени воздействия тока не изменяется [9]. При кратковременных включениях переменного тока коэффициент  $A$  увеличивается во времени экспоненциально, а коэффициент нелинейности  $\beta$ , наоборот, снижается обратно пропорционально времени.

Авторами данной статьи были проведены сравнительные натурные испытания заземлителей при кратковременном воздействии переменного и постоянного тока, а также исследованы вольт-амперные характеристики грунтов на модели с однородным электрическим полем при переменном и постоянном токе.

**Вольт-амперные характеристики грунтов.** Модель с однородным полем представляла собой

два латунных диска диаметром 50 мм, помещенных в цилиндр из изоляционного материала, между которыми зажимался грунт. Расстояние между дисками было равно 11—13 мм; обеспечивалось давление на грунт, равное 3,47 кПа. Измерения проводились при температуре, близкой к комнатной (20 °C). В момент подачи на модель напряжения наблюдался бросок тока, особенно заметный в глинистом грунте. Измерения проводились после установления стационарного режима, спустя 2 с после включения. Удельное электрическое сопротивление грунта определялось по формуле

$$\rho_n = \frac{RS}{d}, \quad (6)$$

где  $\rho_n$  — удельное электрическое сопротивление грунта в модели, условно названное импульсным из-за кратковременности процесса протекания тока;  $S$  — площадь диска;  $d$  — толщина слоя грунта между дисками.

Результаты испытаний образцов песчаного и глинистого грунтов различной влажности при переменном и постоянном токе приведены в приложении (табл. 7—9). По ним были построены зависимости напряженности поля от плотности тока в земле (рис. 1). Как видно, все построенные характеристики в логарифмических координатах являются прямыми линиями. Поэтому эти характеристики удовлетворяют уравнению (4), т. е. описываются показательными функциями. Коэффициенты пропорциональности и нелинейности, определенные для этих характеристик, приведены в табл. 1.

Рассмотрим сначала вольт-амперные характеристики грунтов при переменном токе — графики 1 и 2 на рис. 1. В точках « $a$ » и « $b$ » этих характеристик имеют место изломы при значениях напряженности поля  $E_1=11$  и 25 кВ/м. До этих значений напряженности поля вольт-амперные характеристики грунтов близки к линейным ( $\beta \approx 1$ ,  $A=\rho$  и угол наклона  $\vartheta \approx 45^\circ$ ), а при больших напряженностях имеет место резко нелинейная зависимость напряженности в земле от плотности

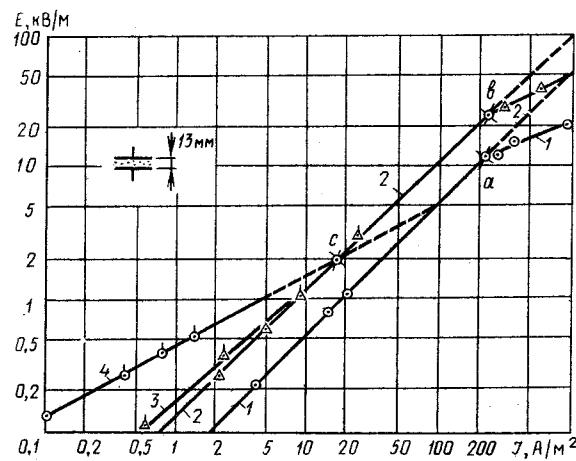


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики грунтов при переменном и постоянном токе: 1, 4 — глина; 2, 3 — песок; 1, 2 — переменный ток 50 Гц; 3, 4 — постоянный ток;  $\odot$ ,  $\odot$ ,  $\Delta$ ,  $\Delta$  — опытные точки;  $\times$  — точки пересечения кривых

**Коэффициенты пропорциональности и нелинейности вольт-амперных характеристик образцов грунта при постоянном и переменном токе**

Номера кривых на рис. 1	Тип грунта, род тока	Влажность, %	$E_1$ , кВ/м	Значения $A$ , $\beta$ , $\phi$ при различных $E$					
				При $E$ менее $E_1$			При $E$ выше $E_1$		
				$A$ , ед. Си	$\beta$ , отн. ед.	$\phi$ , град.	$A$ , ед. Си	$\beta$ , отн. ед.	$\phi$ , град.
1	глина, 50 Гц	32	11	55	0,984	44,5	921	0,456	24,5
2	песок, 50 Гц	15,5	25	133	0,935	43	2466	0,414	22,5
3	песок, постоянный ток	15,5	—	171	0,87	41	—	—	—
4	суглинок; постоянный ток	17	—	446	0,543	28,5	—	—	—

тока. Таким образом, можно условно считать, что при  $E \geq E_1$ , т. е. после точек «*a*» и «*b*» на рис. 1, в земле начинает проявляться эффект Вина: центральные ионы электролита начинают освобождаться от наружной ионной оболочки. В результате этого процесса должно наступать насыщение, и зависимость напряженности поля в земле от плотности электрического тока далее не будет нелинейной. Однако даже при больших напряженностях [8], которые могли быть достигнуты вследствие импульсного характера процесса, насыщение не было зарегистрировано, что может быть объяснено меньшей электрической прочностью грунтов, чем электролитов: пробой грунта наступает раньше, чем насыщение.

Расчеты показали, что в рассматриваемом случае глинистого грунта (кривая 1 на рис. 1) перегрев грунта во время опытов с наибольшей плотностью тока, в которых были получены последняя и предпоследняя опытные точки, составил соответственно 2 и 6 °C, что может привести к уменьшению удельного электрического сопротивления грунта не более, чем на 12 % [10]. Перегревом грунта во всех остальных случаях можно пренебречь.

Необходимо отметить, что зарегистрированные значения напряженности поля, при которых начинается эффект Вина ( $E_1$  в табл. 1), в несколько раз меньше значений начальных напряженностей, указанных в [8, 9].

Теперь рассмотрим ход характеристик 1 и 2 на рис. 1 при  $E < E_1$ , когда обычно определяется удельное электрическое сопротивление грунта. Несмотря на то, что в рассматриваемой области вольт-амперные характеристики близки к линейным, угол их наклона, как видно из табл. 1, менее 45°. Поэтому при уменьшении напряженности ниже  $E_1$  расчетное удельное сопротивление грунта теоретически растет до очень большого или до некоторого постоянного значения, которое, однако, нельзя было получить из результатов, приведенных на рис. 1 для напряженностей от 0,1 до 50 кВ/м.

Для определения вольт-амперных характеристик грунта при относительно малых значениях напряженности поля при переменном токе были выполнены дополнительные испытания глинистого грунта. Для исследований был взят образец глинистого грунта с глубины около 1 м в районе расположения выносного рабочего заземления передачи постоянного тока «Кашира — Москва».

Грунт был помещен в ванночку из изоляционного материала, к противоположным стенкам которой были прикреплены электроды в виде прямоугольных пластин из латуни, создававшие однородное поле. Размеры ванночки составляли 80×82×7,2 мм при расстоянии между электродами 72 мм. При этом напряженность электрического поля в модели рассчитывалась как

$$E = U_m / S = U_m / 0,072 \text{ (В/м)},$$

где  $U_m$  — напряжение между электродами модели с однородным полем. При измерениях обеспечивалось давление на грунт, равное 12 кПа. Испытания проводились в стационарном режиме. Результаты измерений приведены в приложении (табл. 10), где подсчитаны напряженности электрического поля, а также удельное электрическое сопротивление глинистого грунта. По результатам этих измерений была построена вольт-амперная характеристика грунта в логарифмических координатах (рис. 2). Как видно, в точке  $d$  этой характеристики имеется излом, после которого угол наклона характеристики меняется с 45 до 43,5°. Однако, как до, так и после точки  $d$  характеристика является прямой линией. Отсюда следует, что до точки  $d$  вольт-амперная характеристика испытуемого грунта линейна, т. е. подчиняется закону Ома, а при напряженностях поля выше  $E_n = 0,2 \text{ кВ/м} = 2 \text{ В/см}$  в грунте начинаются нелинейные процессы. Несмотря на близость коэф-

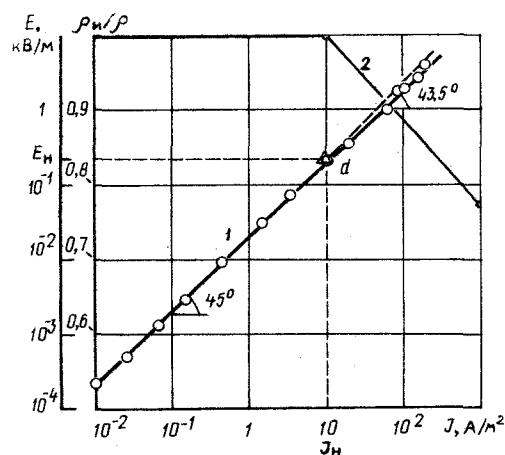


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика (1) и отношение  $\rho_m / \rho$  (2) для глинистого грунта при малых плотностях переменного тока;  $\circ$  — опытные точки;  $\Delta$  — начало нелинейности

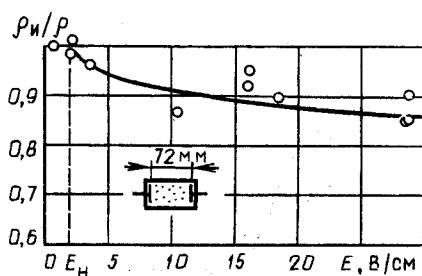


Рис. 3. Зависимость относительного удельного сопротивления глинистого грунта от напряженности электрического поля для переменного тока и результаты эксперимента:  $\circ$  — опытные точки; — — расчет при  $E_n = 2$  В/см

фициента  $\beta$  к 1 изменение значения напряженности поля на несколько порядков может привести к существенному изменению удельного электрического сопротивления грунта. По результатам этих же измерений (приложение, табл. 10) была построена также кривая зависимости удельного электрического сопротивления грунта от напряженности электрического поля в земле (рис. 3). Согласно данным [11] эта зависимость должна описываться следующим уравнением:

$$\rho_n / \rho = (E_n / E)^{1/\beta_1 - 1}, \quad (7)$$

где  $\beta_1$  — коэффициент нелинейности, который в рассматриваемом случае близок к 1.

В логарифмических координатах график этой зависимости является прямой линией с наклоном около  $1,5^\circ$  по отношению к характеристике прямо пропорциональной зависимости. В обычных координатах, как видно из рис. 3, она имеет наибольший наклон за местом перегиба, когда  $\rho_n \approx \rho$ .

При  $E \leq E_n$  удельное электрическое сопротивление грунта  $\rho$ , которое является одной из основных характеристик грунта, не зависит от времени протекания тока. Но чем больше значение напряженности  $E$ , тем эта зависимость проявляется все сильнее. При увеличении напряженности до значения  $E = 15E_n$  наблюдалось уменьшение  $\rho$  во времени со скоростью, примерно равной 1 % регистрируемого значения в секунду.

Как видно из рис. 3, построенная по формуле (7), в которой время отсутствует, теоретическая кривая удовлетворительно согласуется с результатами опытов. При испытаниях образцов глинистого грунта при условиях, когда вольт-амперная характеристика линейна, разброс опытных значений относительно среднего не превышал 1 %. Однако после перегиба характеристики естественное различие значений времени регистрации привело к разбросу до 5 %. Максимальное снижение удельного электрического сопротивления грунта от начала нелинейности и до момента прекращения опытов составило 15 %. Расчет по формуле (7) показывает, что до появления второго перегиба характеристики и перехода на начальные части характеристик 1 и 2 (рис. 1) удельное электрическое сопротивление должно было бы уменьшиться еще на 2 %.

Расчеты показывают также, что при увеличении напряженности от  $E_n$  и до 35 кВ/м удельное электрическое сопротивление грунта уменьшается

в три раза (см. приложение, табл. 9 для переменного тока).

В связи с тем, что эффект Вина сопровождается разрушением ионной оболочки вокруг центрального иона и уменьшением сопротивления, относительно слабое изменение удельного электрического сопротивления, которое зарегистрировано здесь, может быть объяснено дегидратацией ионов и отсутствием зарядов в теряемых молекулах.

Нелинейность вольт-амперных характеристик грунтов подтверждается измерениями сопротивлений различных заземлителей, проведенных авторами в полевых условиях. Результаты этих измерений при напряжении промышленной частоты приведены в табл. 2 и 3. Из данных табл. 2 следует, что при увеличении напряжения в 150 раз сопротивление трубчатого электрода в песчаном грунте уменьшается на 28 %, в то время как принято считать, что песчаный грунт имеет практически линейную вольт-амперную характеристику.

В глинистом грунте сопротивление вертикального заземлителя из кокса, используемого в качестве элемента рабочего заземления передач постоянного тока, при увеличении напряжения промышленной частоты в шесть раз уменьшается примерно в 1,6 раза.

Таблица 2

Сопротивления растеканию тока с трубчатого электрода в песчаном грунте при различных напряжениях переменного тока 50 Гц (длина трубы 800 мм, диаметр 114 мм)

Напряжение, В	Ток, А	Напряженность, В/м	Сопротивление растеканию, Ом	Расчетное удельное электрическое сопротивление, Ом·м
2,1	0,0172	13	123	286
59,6	0,51	365	116	271
114	1,26	699	90,5	210
300	3,35	1840	89	208

Таблица 3

Сопротивления растеканию тока с вертикального коксового заземлителя в глинистом грунте при различных напряжениях переменного тока 50 Гц (длина 0,5 м, сечение  $0,4 \times 0,4$  м; влажность грунта 17 %)

Напряжение, В	Ток, А	Сопротивление растеканию, Ом	Наибольшая расчетная напряженность поля на поверхности земли, В/м
33	0,537	61,45	153
60,75	1,0	60,75	283
178	4,5	39,6	825
196	5	39,2	915

**Вольт-амперные характеристики образца грунта и сопротивления заземлителей при постоянном токе.** При растекании с заземлителем постоянного тока, кроме описанных уже явлений, существенную роль играют напряжения поляризации, зависящие от материалов электродов и возникающие в непосредственной близости от каждого из электродов. Указанное обстоятельство

может осложнить расчет заземлителей при нелинейных характеристиках грунта.

Вольт-амперные характеристики образцов глинистого и песчаного грунтов, полученные на модели с однородным электрическим полем с латунными электродами и построенные по данным таблиц в приложении, приведены на рис. 1. Как видно из рис. 1, эти характеристики, так же, как и при переменном токе, являются прямыми линиями. Поэтому они удовлетворяют уравнению (4).

**Испытания заземлителей при постоянном токе.** Зависимость удельного электрического сопротивления грунтов от напряженности электрического поля подтверждается также натурными испытаниями, проведенными авторами. Результаты этих испытаний приведены в табл. 4—6. Во время испытаний полусферического заземлителя (рис. 4) при увеличении напряжения в пять раз расчетное удельное электрическое сопротивление уменьшается в 2,3 раза при отрицательном потенциале электрода и в 1,3 раза — при положительном. Эффект уменьшения сопротивления заземлителя при росте на нем напряжения снижается для всей системы рабочего заземления вследствие последовательно включенного сопротивления подводящей линии.

Из рис. 1 и табл. 4—6 следует, что сопротивления заземлителей при отрицательном потенциале приложенного напряжения могут быть гораздо

Таблица 4  
Сопротивления растеканию тока с полушарового заземлителя в глинистом грунте при различных значениях приложенного напряжения (влажность 38 %)

Напряжение, В	Ток, А	Положительная или отрицательная полярность электрода	Напряженность, В/м	Сопротивление, Ом	Расчетное удельное электрическое сопротивление, Ом·м
1,4	0,0035	+	144	444	27,2
1,4	0,0014	-	144	1000	61,3
2,9	0,0082	+	298	354	21,8
2,9	0,0048	-	298	606	37,2
7,2	0,0215	+	740	335	20,6
7,2	0,0165	-	740	436	26,8
30	0,092	переменный ток 50 Гц	3080	326	20,0

Таблица 5  
Сопротивления растеканию тока с заземлителя, выполненного из кокса в глинистом грунте, при различных значениях приложенного напряжения (длина электрода 14 м, сечение 0,8×0,8 м, глубина закладки 1,2 м)

Напряжение, В	Ток, А	Сопротивление растеканию, Ом	Род тока
+2,76	0,37	6,96	постоянный
+6,2	1,12	4,67	—»—
+8,4	1,75	4,3	—»—
+10,5	2,3	4,1	—»—
30	8,57	3,5	переменный 50 Гц

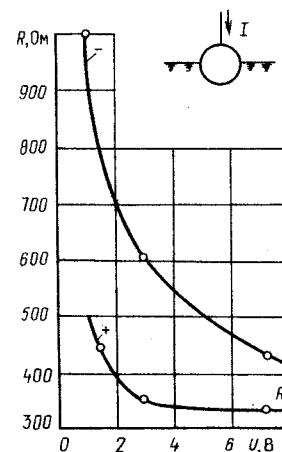


Рис. 4. Зависимости сопротивлений полусферического заземлителя от напряжения при положительном и отрицательном потенциалах на электроде: ○ — опытные точки

больше, чем при положительном. Кроме того, из рис. 1 и 4 видно, что при увеличении напряженности (и плотности тока в земле) напряжение поляризации постепенно уменьшается, пока сопротивление при постоянном токе не станет равным сопротивлению при переменном токе.

Отсюда следует, что при достаточных плотностях тока через электроды сопротивления заземлителей при постоянном токе можно рассчитывать так же, как и при переменном. Однако для расчета заземлителей при постоянном токе в общем случае должен быть разработан аналитический метод. Из-за напряжений поляризации сопротивления при постоянном токе (при прочих равных условиях) являются более нелинейными, чем при переменном.

Учет в процессе проектирования и сооружения заземлителей обнаруженного эффекта снижения удельного электрического сопротивления грунта, а также выявленных закономерностей, очевидно, даст экономический эффект в связи с уменьшением расчетных значений сопротивлений и, следовательно, снижением расхода материалов. Чтобы получить этот экономический эффект, при изысканиях следует определять вольт-амперные характеристики грунтов, а не измерять удельное электрическое сопротивление, так как в настоя-

Таблица 6  
Сопротивления растеканию тока с системой рабочего заземления при различных значениях приложенного напряжения постоянного тока

Наименование системы рабочего заземления	Напряжение, В	Ток, А	Сопротивление растеканию, Ом
Контур заземления 19×62 м в г. Москве	+13,5 +25,0	10 20	1,35 1,25
Контур заземления 40×40 м в г. Кашире	+14,5 +27,0	10 20	1,45 1,35

Примечание: В сопротивление растеканию тока с системой входит сопротивление подводящей линии, равное в Москве 0,24 Ом, а в Кашире — 0,6 Ом.

щее время не ясна связь между физико-химическими и электрическими характеристиками грунтов.

**Выходы.** 1. При воздействии переменного тока обнаружена слабая нелинейность грунта, которая начинается при относительно малой напряженности поля, равной 2 В/см, что на несколько порядков меньше ранее известных значений начальных напряженностей. Эта нелинейность может быть объяснена явлением дегидратации ионов электролита грунта под воздействием электрического поля в земле. В области слабой нелинейности вольт-амперные характеристики грунтов описываются также показательными функциями.

2. Удельное электрическое сопротивление грунта в нелинейной области является функцией времени. До указанной начальной напряженности соблюдается закон Ома, и удельное электрическое сопротивление не зависит от времени воздействия.

3. Вольт-амперные характеристики образца грунта при постоянном токе в однородном электрическом поле при относительно малых напряженностях поля всегда описываются показательными функциями и имеют меньший коэффициент нелинейности, чем при переменном токе. Сопротивление образца грунта при постоянном токе больше, чем при переменном токе, но с увеличением приложенного напряжения его сопротивление стремится к величине, измеренной при переменном токе.

4. Использование полученных закономерностей в практике проектирования заземлителей в сетях переменного тока может дать экономический эффект при условии измерения вольт-амперных характеристик грунтов на трассах ВЛ и в местах расположения подстанций.

5. Должен быть разработан метод расчета заземлителей при растекании постоянного тока с учетом нелинейности грунтов.

#### Приложение. Результаты испытаний образцов грунта в модели однородного поля.

Таблица 8  
Значения удельного электрического сопротивления суглинка (влажность 17 %) при различных значениях напряженности электрического поля

Напряжение, В	Напряженность поля, В/м	Плотность тока, А/м <sup>2</sup>	Сопротивление, Ом	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Примечание
1,42	129	0,102	7200	1266	Постоянный ток
2,88	262	0,408	3600	642	»
4,3	391	0,785	2790	498	»
5,78	525	1,4	2100	375	То же
30	2700	16,4	925	165	Переменный ток

Таблица 9  
Значение удельного электрического сопротивления сырого песка (влажность 15,5 %) при различных значениях напряженности электрического поля

Напряжение, В	Напряженность поля, В/м	Плотность тока, А/м <sup>2</sup>	Сопротивление, Ом	Расчетное удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Примечание
1,5	107	0,586	1300	182	Постоянный ток
5	357	2,39	1064	149	То же
8	571	5,1	800	112	»
40	2 856	25,5	769	108	»
3,8	271	2,14	905	127	Переменный ток
14,8	1 057	9,17	822	115	То же
376	26 857	331	578	81	»
500	35 714	657	400	56	»

Таблица 10  
Значения удельного электрического сопротивления глинистого грунта (влажность 20 %) при различных значениях напряженности электрического поля

№ п/п	Напряжение, В	Напряженность поля, В/м	Плотность тока, А/м <sup>2</sup>	Сопротивление, Ом	Расчетное удельное электрическое сопротивление, Ом·м
1	0,094	0,194	0,00976	219	19,95
2	0,038	0,53	0,0253	219	19,95
3	0,1	1,396	0,0695	220	20,0
4	0,216	3,0	0,151	218	19,86
5	0,698	9,67	0,48	220	20,0
6	2,19	30,4	1,55	217	19,77
7	5,0	69,4	3,45	221	20,1
8	15,15	210	10,8	215	19,6
9	16,12	224	11,5	220	20,0
10	25,5	354	18,6	209	19,0
11	133	1850	103,3	196	17,8
12	209	2900	161,6	197	17,9
13	76	1060	61	190	17,3
14	117	1630	85,7	208	18,9
15	116	1610	87,7	202	18,4
16	207	2880	167,7	188	17,1
17	206	2860	169,2	186	16,9
18	0,0356	0,494	0,0241	214	17,5
19	5,0	69,4	0,491	216	17,7

Таблица 7  
Значения удельного электрического сопротивления сырой глины (влажность 32 %) при различных значениях напряженности электрического поля при переменном токе

Напряжение, В	Напряженность поля, В/м	Плотность тока, А/м <sup>2</sup>	Сопротивление, Ом	Расчетное удельное электрическое сопротивление, Ом·м
3,1	221	4,1	387,5	54,25
11	786	14,7	382	53,4
15	1071	20,4	375	52,5
164	11 714	280	298	41,7
200	14 286	382	267	37
300	21 429	994	154	21,5

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропов Л. Н. Теоретическая электрохимия.— М.: Высшая школа, 1984.
  2. Wien M. Über eine Abweichung vom Ohmischen Gesetze bei Electrolyten.— Annalen der Physik, 1927, Bd 83, S. 327.
  3. Onsager L. J.— Chemische Physik, 1934, Bd 2, S. 595.
  4. Town H. M. Impulse characteristics of driven grounds.— General Electric Review, 1928, vol. 31.
  5. Беляков А. П., Иванов Л. И., Попков В. И. Поведение заземлителей при импульсных токах. Л—М.: ОНТИ—ГЭИ, 1934, № 30.
  6. Беляков А. П. Основания для проектирования заземлений электрических установок.— М.: ГНТИ, 1938.
  7. Рябкова Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения.— М.: Энергия, 1978.
  8. Анненков В. З. Вольт-амперные характеристики грунтов при токах молний.— Электричество, 1986, № 2.
  9. Анненков В. З. Вольт-амперные характеристики грунта при протекании тока промышленной частоты.— Электричество, 1991, № 3.
  10. Терентьева Л. П. Электрические свойства почв и грунтов.— Всес. конф. по заземлениям, Харьков, ХПИ, 1966.
  11. Анненков В. З. Вольт-амперные характеристики грунтов и сопротивление сопредоточенных заземлителей при токах молний. Деп. рукопись.— М.: ВНИТИ, 1983, № 1209Эн-Д83.
- [28.12.90]

УДК 621.316.731.013.1.001.6

## Индукционные токоограничители с коммутацией магнитного потока

ЯКИМЕЦ И. В., НАРОВЛЯНСКИЙ В. Г., ФЛЕЙШМАН Л. С.

Москва

Устройства, реализующие индукционный принцип токоограничения путем перераспределения потоков в многостержневой магнитной системе трансформатора, снабженной управляемыми сверхпроводниковыми экранами, были рассмотрены в [1]. Эти устройства предполагается использовать для уменьшения влияния воздействия аварийных токов на комплекс станционного сверхпроводникового оборудования. Целью данной статьи является определение основных параметров, связанных с техническими характеристиками индукционных токоограничителей, и оценка соответствия указанных параметров требованиям, предъявляемым к силовому электрооборудованию станции.

**Внешние характеристики индукционного токоограничивающего устройства.** На рис. 1 приведена принципиальная схема однофазного индукционного устройства, объединяющего функции трансформатора и токоограничителя. На двухстержневом с боковым ярмом магнитопроводе расположены первичная  $w_1$ , вторичная  $w_2$ , дополнительная  $w_4$  обмотки и замкнутая накоротко сверхпроводниковая обмотка  $w_3$  (экран). Обмотки  $w_2$  и  $w_4$  включены последовательно и встречно, причем число витков дополнительной обмотки  $w_4$  выбирается в зависимости от требуемой кратности токоограничения. При дальнейшем анализе предполагается, что магнитное сопротивление средней ветви магнитопровода 2 равно  $R_{\mu 2}$ , а магнитное сопротивление  $R_{\mu 1}$  бокового стержня 1 и бокового ярма  $R_{\mu 3}$  включают в себя и сопротивления соответствующих участков верхнего и нижнего ярм магнитопровода. Принимается, что сопротивления стержней не зависят от режима работы устройства. Для уточнения результатов при такой идеализации предполагается, что магнитные соп-

ротивления определены в рабочей области изменения потоков, благодаря чему в некоторой степени учитывается насыщение стали сердечника. Обмотки токоограничителя могут быть расположены концентрически, причем первичная  $w_1$  и экран  $w_3$  являются наружными, а вторичная  $w_2$  и дополнительная  $w_4$  — внутренними. Переход материала экрана в нормальное состояние происходит в режимах токовой аварийной перегрузки при резком увеличении напряженности магнитного поля на его поверхности под действием тока в обмотке  $w_4$ .

В режиме холостого хода ( $I_2 = 0$ ) выделим стержень 2, заменив остальной магнитопровод с обмотками эквивалентным генератором намагничивающей силы  $\dot{F}_0$  и магнитным сопротивлением  $Z_{m0}$ . Представим экран в виде обмотки с числом витков  $w_3$ , связанных с потоком в стержне  $\dot{F}_2$ , путем замыкания которого между ярмами

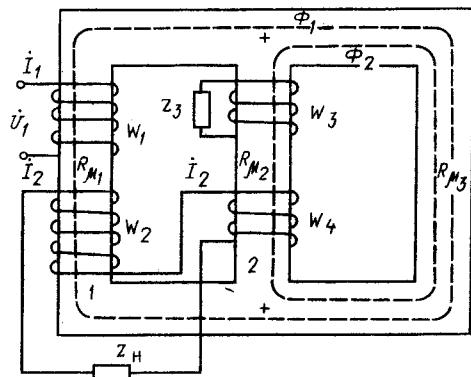


Рис. 1. Принципиальная расчетная схема однофазного устройства, объединяющего функции трансформатора и токоограничителя

проходит по стержню 2, и потоком  $\Phi_s$ , путь замыкания которого проходит вокруг экрана вне ярм; последний определяет индуктивность  $L_s = \omega_3^2/R_s$ , где  $R_s$  — магнитное сопротивление потоку  $\Phi_s$ . Экран нагружен активным сопротивлением  $r_s$ . При указанных условиях система уравнений выделенного участка магнитопровода имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_0 + \dot{F}_{R2} &= (R_{\mu 2} + z_{m0}) \dot{\Phi}_2; \quad (r_s + j\omega L_s) \dot{I}_3 + \\ &+ j\omega \omega_3 \Phi_2 = 0; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\dot{F}_0 = (z_{m0} + R_{\mu 2}) \dot{\Phi}_{02}; \quad \dot{F}_{R2} = \omega_3 \dot{I}_3; \quad L = \omega \omega_3^2 / (R_{\mu 2} + z_{m0} + L_s).$$

Здесь  $L$  — индуктивность экрана, находящегося на стержне 2 магнитопровода, на стержне 1 которого имеется обмотка  $\omega_1$ , замкнутая на внутреннее сопротивление источника питания (при  $\dot{U}_1 = \text{const}$  обмотка  $\omega_1$  замкнута накоротко); при дальнейшем анализе используется эффективное значение  $L$  за период промышленной частоты;  $\dot{\Phi}_{02}$  — поток в стержне 2 при отсутствии экрана.

В результате решения системы (1) имеем

$$\left. \begin{aligned} \dot{\Phi}_2 / \dot{\Phi}_{02} &= \sqrt{(\alpha_s^2 + \beta^2) / (1 + \beta)^2} e^{j\varphi}; \\ \operatorname{tg} \varphi &= -\beta(1 - \alpha_s) / (\alpha_s + \beta); \quad \alpha_s = L_s / L; \\ \beta &= r_s / \omega L. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Из соотношения (2) видно, что при отсутствии в цепи экрана активного сопротивления ( $\beta = 0$ ) поток, пропускаемый экраном, определяется индуктивностью  $L_s$  и совпадает по фазе с исходным потоком:  $\dot{\Phi}_2 = \alpha_s \dot{\Phi}_{02}$ . При введении в цепь экрана активного сопротивления через экранируемый стержень проходит переменный поток, величина и фаза которого определены значением  $\beta$ . При  $\beta \geq 7$  экран практически полностью пропускает магнитный поток:

$$\dot{\Phi}_2 \approx \dot{\Phi}_{02}. \quad (3)$$

Анализ соотношений (1) — (3) показывает, что в устройствах трансформаторного типа с коммутаторами магнитного потока величины суммарного напряжения на обмотках  $\omega_2$ ,  $\omega_4$  и внутреннего сопротивления устройства в режиме нормального состояния экрана  $\omega_3$  и, в конечном счете, уровень токоограничения являются функциями конструкционных параметров  $\beta$ ,  $\alpha_s$ ,  $w$ ,  $R_\mu$ . Значения указанных параметров могут быть оценены на основе технических характеристик выпускаемых в настоящее время сверхпроводниковых материалов и стандартных соотношений геометрических размеров элементов магнитной системы силового трансформаторного оборудования. В частности, условие эффективного экранирования можно записать в виде

$$J_c \geq \sqrt{2} A K_c K_s / \Delta_\Sigma, \quad (4)$$

где  $J_c$  — плотность тока;  $A$  — линейная токовая нагрузка обмоток трансформаторов ( $\text{A}/\text{м}$ );  $K_s = (1,5 \div 3)$  — коэффициент запаса по сверхпроводнику, характеризующий уровень ограничивающего тока;  $\Delta_\Sigma$  — суммарная толщина экрана, рав-

ная (при использовании в многослойном экране витков из материала одинаковой толщины) произведению числа витков  $\omega_3$  на толщину одного витка  $\Delta$ ;  $K_c = \omega_4 / \omega_2$  — коэффициент схемы. В современных мощных трансформаторных устройствах при частоте 50 Гц и индукции в стержне, равной примерно 1,6 Тл, линейная номинальная токовая нагрузка составляет  $A = 80 \text{ кA}/\text{м}$  [2].

Аналогично можно получить выражение для удельного сопротивления материала экрана в нормальном состоянии, при котором обеспечивается пропускание переменного магнитного потока в экранируемый стержень:

$$\rho \geq \beta h \Delta \omega / \pi D_{cp} R_\mu, \quad (5)$$

где  $\beta$  — коэффициент, характеризующий уровень экранирования;  $D_{cp}$  — средний диаметр экрана, учитывающий также наличие стенок диэлектрического криостата, выбранных с учетом требований механической и диэлектрической прочности;  $h$  — высота экрана, равная высоте экранируемой обмотки;  $1/R_\mu \approx 2,5 \cdot 10^{-4}$  Гн — индуктивность одного витка, практически неизменная для ряда геометрически подобных трансформаторных устройств разной мощности [3];  $\pi D_{cp} / h \approx (3,5 \div 4)$ .

Выражения (4), (5) позволяют сформулировать требования к материалу экрана при заданных  $\beta$  и  $K_c$ . Следует отметить, что условие (3), обеспечиваемое при  $\beta \geq 7$ , предъявляет высокие требования к экрану в связи с тем, что даже у ниобий-титановых лент, лучших с точки зрения нормального сопротивления технически освоенных сверхпроводников,  $\rho_h \leq 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Для выполнения (3) требуемое значение активного сопротивления экрана в нормальном состоянии может быть обеспечено в основном за счет специального увеличения длины экрана, что, в свою очередь, приведет к существенному усложнению конструкции и режима криостатирования. В то же время, как будет показано ниже, достаточного для практики уровня послеаварийного тока можно добиться и при  $\beta < 7$ .

Оценку соответствия уровня токоограничения конкретным значениям  $\beta$  и  $K_c$  проведем на основе схемы (рис. 1), используя метод эквивалентного генератора. Запишем уравнения для магнитных цепей, пренебрегая выходом магнитного потока за пределы магнитопровода:

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_1 + \dot{F}_2 &= (R_{\mu 1} + R_{\mu 3}) \dot{\Phi}_1 + R_{\mu 3} \dot{\Phi}_2; \quad \dot{F}_4 = K_c \dot{F}_2; \\ \dot{F}_3 + \dot{F}_4 &= R_{\mu 3} \dot{\Phi}_1 + (R_{\mu 2} + R_{\mu 3}) \dot{\Phi}_2; \quad 0 = j\omega \omega_3^2 \dot{\Phi}_2 + \\ &+ z_3 \dot{F}_3. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При этом для цепей обмоток имеем:  
при питании со стороны  $\omega_1$

$$0 = j\omega \omega_2^2 (\dot{\Phi}_1 + K_c \dot{\Phi}_2) + \dot{F}_2 z_h; \quad \dot{U}_1 = j\omega \omega_1 \dot{\Phi}_1, \quad (7)$$

при питании со стороны  $\omega_2$ ,  $\omega_4$

$$\dot{U}_{24} = j\omega \omega_2 (\dot{\Phi}_1 + K_c \dot{\Phi}_2); \quad 0 = j\omega \omega_1^2 \dot{\Phi}_1 + \dot{F}_1 z_h. \quad (8)$$

Здесь  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_{24}$  — соответственно напряжения обмоток  $\omega_1$  и  $\omega_2 - \omega_4$ ;  $\dot{F}_1$ ,  $\dot{F}_2$ ,  $\dot{F}_3$ ,  $\dot{F}_4$  — намагничивающие силы обмоток;  $z_3$  — сопротивление в цепи обмотки экрана;  $z_h$  — сопротивление вторичной обмотки.

В результате решения уравнений (6) — (8) — параметры эквивалентного генератора имеют вид:

$$\dot{U}_{x,x24} = [1 + (1 + \rho_\mu) \dot{\gamma} (1 - v)] / [1 + (1 + \rho_\mu) \dot{\gamma}] ; \quad (9)$$

$$\dot{U}_{x,x1} = \frac{1 + (1 + \rho_\mu) \dot{\gamma} (1 - v)}{1 + (1 + \rho_\mu) \dot{\gamma} [1 - 2v + \frac{1 + \rho_\mu}{\rho_\mu} v^2]} ; \quad (10)$$

$$I_{k,3} = \rho_\mu [1 + (1 + \rho_\mu) \dot{\gamma} (1 - v)] / \dot{\gamma} v^2 (1 + \rho_\mu) ; \quad (11)$$

где  $\rho_\mu = R_3^2 / (R_{\mu 1} R_{\mu 2} + R_{\mu 1} R_{\mu 3} + R_{\mu 3} R_{\mu 2})$ ;  $v = K_c R_{\mu 3} / (R_{\mu 2} + R_{\mu 3})$ ;  $\dot{\gamma} = \frac{z_3}{j\omega L_3} = \frac{z_3 (R_{\mu 1} R_{\mu 2} + R_{\mu 1} R_{\mu 3} + R_{\mu 3} R_{\mu 2})}{j\omega (R_{\mu 1} + R_{\mu 3}) w_3^2}$

параметры, выраженные через характеристики магнитной цепи; при использовании в режимах токоограничения нормального состояния экрана и при условии  $\beta \gg a_s$

$$\dot{\gamma} \approx -j\beta ; \quad (12)$$

$\dot{U}_{x,x24} = \dot{U}_{x,x24} w_1 / \dot{U}_1 w_2$ ;  $\dot{U}_{x,x1} = \dot{U}_{x,x1} w_2 / \dot{U}_{24} w_1$  — относительные, приведенные к соответствующим питающим напряжениям, напряжения холостого хода обмоток;  $\dot{I}_{k,3} = I_{k,3} / I_{x,x}$  — ток короткозамкнутой обмотки, отнесенный к току холостого хода этой же обмотки при сверхпроводящем состоянии экрана.

На рис. 2 приведены кривые изменения напряжения холостого хода, тока к. з. и его аргумента в индукционном токоограничителе в зависимости от  $\beta$  при изменении параметра  $K_c$ . Кривые характеризуют работу варианта устройства со встречным включением обмоток  $w_2$ ,  $w_4$  при питании со стороны  $w_1$ . Требуемому уровню токоограничения могут соответствовать оптимальные значения  $K_c$  и  $\beta$ .

Экспериментальная проверка полученных соотношений проводилась на макетном образце индукционного токоограничителя с магнитной системой (рис. 1). Полная мощность устройства в однофазном исполнении 12,7 кВ·А, напряжения  $U_1 = U_2 = 127$  В, токи в обмотках  $I_1 = I_2 = 100$  А, количество витков в обмотках  $w_1 = 51$ ,  $w_2 = 51$ ,  $w_4 = 68$ ,  $w_3 = 1$ ; материал магнитопровода — сталь Э310, материал обмоток  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_4$  — алюминиевый провод сечением  $13,5 \times 3,5$  мм<sup>2</sup>.

Первичная обмотка располагается на стержне  $R_{\mu 1}$  в три слоя по 17 витков; над ней, также в три слоя по 17 витков, расположена первая секция вторичной обмотки. Вторая секция вторичной обмотки включена встречно с первой секцией и расположена на стержне  $R_{\mu 2}$  в четыре слоя по 17 витков. Поверх второй секции на том же стержне располагается стеклопластиковый криостат с обмоткой экрана. Экран представляет собой замкнутый виток сверхпроводниковой ленты из материала NbTi высотой  $2 \times 8 \cdot 10^{-2}$  м в стеклопластиковом бандаже.

На основе измерения характеристик холостого хода определены сопротивления стержней устройства:  $R_{\mu 1} = R_{\mu 3} = 17700$  Гн<sup>-1</sup>,  $R_{\mu 2} = 5900$  Гн<sup>-1</sup>. В соответствии с определенными магнитными сопротивлениями параметры  $\gamma = 1$ ,  $\rho_\mu = 0,6$ .

Исследование послеаварийного режима было проведено для сверхпроводникового экрана с двумя значениями параметра  $\beta = 1,2$  и  $\beta = 3,37$ . Экспериментально измеренные при таких параметрах напряжения холостого хода и токи к. з., а также расчетные результаты приведены в табл. 1 и 2 (соответственно для значений напряжения

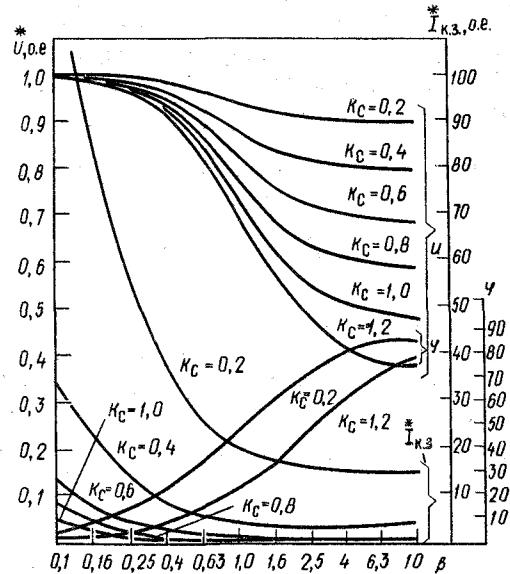


Рис. 2. Кривые изменения напряжения холостого хода ( $\dot{U}$ ), тока к. з. ( $\dot{I}$ ) и его аргумента ( $\varphi$ ) в зависимости от  $\beta$  при изменении параметра  $K_c$

Таблица 1

$\beta$	Метод	$U_{x,x,24}$ , В	$I_{k,3,24}$ , А	$I_1$ , А
1,2	эксперимент	60,0	0,67	3,3
	расчет	58,8	0,73	—
3,37	эксперимент	25,0	0,22	1,6
	расчет	23,2	0,26	—

Таблица 2

$\beta$	Метод	$U_{x,x,1}$ , В	$I_{k,3,1}$ , А	$I_{k,3,24}$ , А
1,2	эксперимент	41,0	0,67	1,50
	расчет	38,1	0,73	—
3,37	эксперимент	15,0	0,22	1,15

питания со стороны обмотки  $U_1 = 127$  В и  $U_{24} = 127$  В).

Сравнительный анализ номинального (100 А) и послеаварийных значений токов показывает возможность очень глубокого токоограничения, вплоть до токов намагничивания трансформатора.

**Условия коммутации сверхпроводникового экрана.** Поскольку принцип действия индукционного токоограничителя основан на изменении фазового состояния материала сверхпроводникового экрана, то для оценки эффективности действия устройства необходимо связать геометрические и электрофизические параметры экрана с динамическими характеристиками энергосистемы.

При трехфазном к. з. в отходящей от шин индукционного токоограничителя линии электропередачи изменение поля на поверхности экрана можно согласно [4] представить в виде:

$$\dot{H} = K_c / z_k (e^{-\gamma/T} - \cos \omega t), \quad (13)$$

где  $\dot{H}$  — относительное значение напряженности магнитного поля;  $\dot{z}_k$  — относительное значение полного сопротивления цепи к. з.;  $T$  — эквивалентная постоянная времени.

За базисные величины приняты максимальные значения фазных тока и напряжения:

$$I_6 = \sqrt{2} I_{\text{ном}}; U_6 = \sqrt{2} U_{\text{ном}}; z_6 = U_{\text{ном}} / I_{\text{ном}}; H_6 = A \sqrt{2}.$$

Принимая в соответствии с [4] некоторое усредненное значение  $T=0,045$  с, одинаковое для всех ветвей энергосистемы, можно оценить время достижения двух-, трехкратной перегрузки при к. з. на выводах индукционного токоограничителя ( $\dot{z}_k \approx x_k = 0,18$ ). В частности,  $\dot{H}=2,6$  достигается через  $t=0,004$  с, а  $\dot{H}=3,3$  — через  $t=0,0045$  с, т. е. анализ аварийного режима можно проводить в условиях адиабатического приближения.

Процессы, происходящие в экране в режиме аварийного изменения поля на его поверхности, можно связать с появлением полных скачков потока, приводящих к переходу материала экрана в нормальное состояние. Оценку такого предположения можно провести на основе соотношения, предложенного в [5]:

$$\Delta T_m = T_0 \left[ \left( 1 + \frac{4 \Delta E_{em}}{C(T) T} \right)^{1/4} - 1 \right], \quad (14)$$

где

$$\Delta E_{em} = \frac{H_a^2}{8\pi} \left( 1 - \frac{H_a}{3H_p} \right) - \quad (15)$$

диссипация энергии в единице объема экрана;  $\Delta T$  — превышение температуры экрана над температурой хладагента  $T_0$ ;  $H_a$  — напряженность поля на поверхности экрана в момент образования скачка потока;  $H_p$  — напряженность поля полного проникновения;  $C(T_0)$  — теплоемкость материала экрана.

Полагая, что экран выполнен из ниобий-титановой ленты с  $T_0=8,0$  К и  $C(T_0)=1,12 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>3</sup> К, и принимая  $H_p=3H_6K_c$ ,  $K_c=0,8$ , имеем согласно (14) и (15) при трехкратной перегрузке ( $H_a=3H_6K_c$ ) разогрев материала экрана до температуры, приблизительно равной 10 К, достаточной для перехода ниобий-титанового сверхпроводника в нормальное состояние. Полученная оценка может считаться точной при условии  $T_m > T_c$ , где  $T_c$  — критическая температура сверхпроводника.

Для координации момента срабатывания токоограничивающего устройства с уровнем аварийных токов энергосистемы необходимо определить границу устойчивости критического состояния экрана. В большинстве известных работ начало появления скачка потока связывают с равенством нулю эффективной удельной теплоемкости сверхпроводникового объекта [6]. С учетом временной зависимости поля на поверхности экрана  $B_a(t)$  локальное значение индукции  $B(x, t)$  в экране тол-

щиной  $2d$  можно определить соотношением

$$\left. \begin{aligned} B(x, t) &= 0, \\ B(x, t) &= B_a(t) + \mu_0 J_c(x-d), & 0 \leq x \leq l; \\ d-l &= B(t)_a / \mu_0 J_c, & l \leq x \leq d, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $d$  — половина толщины экрана;  $l$  — глубина проникновения поля.

Учитывая, что

$$\frac{\partial B(x, t)}{\partial t} = \frac{dB_a(t)}{dt} + \mu_0 \frac{dT}{dt} \frac{dJ_c}{dT}(x-d),$$

для напряженности электрического поля экрана  $E(x, t)$  имеем

$$\begin{aligned} E(x, t) &= \int_l^x \left[ \frac{dB_a(t)}{dt} + \mu_0 \frac{dT}{dt} \frac{dJ_c}{dT}(x-d) \right] dx = \\ &= \frac{dB_a(t)}{dt} (x-l) + \frac{\mu_0}{2} \frac{dT}{dt} \frac{dJ_c}{dT} [(x-d)^2 - (l-d)^2]. \end{aligned} \quad (17)$$

Соответственно потери при изменении поля на поверхности экрана равны

$$\begin{aligned} P_h &= \frac{1}{d} \int_l^d J_c E dx = \frac{dB(t)}{dt} \frac{B_a^2(t)}{2\mu_0 J_c d} + \frac{\mu_0 J_c}{3d} \frac{dT}{dt} \times \\ &\times \left| \frac{dJ_c}{dT} \right| \left( \frac{B_a(t)}{\mu_0 J_c} \right)^3. \end{aligned} \quad (18)$$

Первый член выражения (18) характеризует диссипацию энергии в сверхпроводниковом экране, связанную в основном со скоростью изменения внешнего поля. По оценкам, проведенным в [7], влияние этой энергии на процесс перехода сверхпроводника в нормальное состояние не существенно. Так, прямое измерение в диапазоне температур 6—8 К при  $B_m=0,25$  Тл показало увеличение температуры  $T \leq 0,15$  К.

Второй член выражения (18) описывает уменьшение эффективной теплоемкости за счет диссипации при изменении части энергии, запасенной экранирующими токами. Условие обращения эффективной теплоемкости в ноль имеет вид

$$C(T_0) = \frac{1}{3} \left| \frac{dJ_c}{dT} \right| d \frac{B_a^3}{B_p^2}, \quad (19)$$

где  $B_p$  — индукция, при которой экран полностью заполнен током.

Соответствующая (19) величина внешней индукции на поверхности экрана, при котором любое малое тепловое возмущение приводит к неограниченному росту температуры, имеет вид

$$B_a = B_p^{1/3} \left( \frac{3C(T_0) \mu_0 J_c}{\left| \frac{dJ_c}{dT} \right|} \right)^{1/3}. \quad (20)$$

И, наконец, толщина экрана, обеспечивающая условие  $B_{aj} \leq B_p$ , равна

$$d > d_j = \sqrt{\frac{3C(T_0)}{\mu_0 J_c \left| \frac{dJ_c}{dT} \right|}}. \quad (21)$$

Для принятых в статье параметров  $C(T_0)=1,12 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>3</sup> К,  $J_c=5 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>,  $\left| \frac{dJ_c}{dT} \right| = 0,3 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> К,  $d=42 \cdot 10^{-6}$  м.

На рис. 3 приведена осциллограмма изменения тока обмотки, снятая на макетном образце индукционного токоограничителя при к. з. на его выводах. Нижняя кривая характеризует питающее напряжение, верхняя — ток нагрузки. Исходные данные эксперимента: толщина сверхпроводникового экрана  $d_s = 15 \cdot 10^{-6}$  м, температура хладагента  $T_0 = 6$  К,  $J_{c(T_0=6\text{ K})} = 0,6 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>.

Как видно из осциллограммы, кривая тока характеризуется резким уменьшением в момент переключения экрана и отдельными всплесками относительно установившегося значения на уровне тока холостого хода. Время снижения тока в момент переключения экрана было оценено для аналогичного режима примерно в 100—200 мкс [8]. Возможность появления всплеска тока вследствие интенсивного охлаждения перешедшего в нормальное состояние сверхпроводника отмечалась в [9].

Хотя напряженность поля проникновения экрана составляла  $H_p \approx 9$  кА/м, переключение экрана произошло при  $H_a = 1,3$  кА/м. В первую очередь это можно объяснить влиянием радиальной составляющей магнитного поля, действующей на периферийные участки экрана. Неустойчивое состояние периферийных участков экрана обуславливает преждевременный переход в нормальное состояние всего объема экрана. Такое предположение о реальной работе устройства достаточно хорошо согласуется с результатами исследования влияния взаимодействия радиальных и продольных магнитных полей на устойчивость сверхпроводниковых магнитных систем. В частности, степень снижения тока в сверхпроводниковой обмотке непосредственно связана с соотношением радиальной  $B_p$  и продольной  $B_n$  составляющих магнитного поля; такое снижение полностью отсутствует при  $B_p/B_n \approx 0,1$ , а при  $B_p/B_n \approx 0,2$  критический ток обмотки может снизиться почти вдвое.

Повышение границы устойчивой работы экрана можно обеспечить рядом технических мероприятий, связанных как с уменьшением радиальной составляющей поля, так и с увеличением стабильности периферийных участков экрана. В частности, даже такое простое мероприятие, как выполнение периферийных частей экрана в виде ряда электрически не связанных колец, препятствующее распространению тепла в центральную зону, позволило повысить устойчивость экрана на (30—40 %).

С точки зрения эффективности работы индукционного устройства осциллограмма (рис. 3) по-

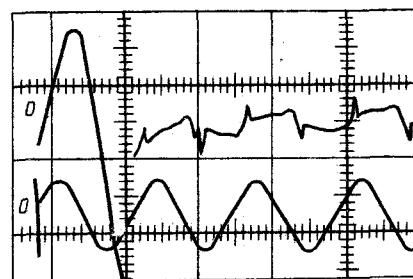


Рис. 3. Осциллограмма изменения тока обмотки при к. з. на выводах индукционного токоограничителя

казывает возможность глубокого ограничения аварийного тока с максимальным быстродействием в доли периода промышленной частоты.

**Выводы.** 1. Сверхпроводниковые индукционные токоограничители, в которых реализуется принцип коммутации магнитного потока, позволяют исключить воздействие на защищаемое электрооборудование ударных значений аварийного тока.

2. Получены расчетные соотношения, позволяющие координировать коммутационные характеристики сверхпроводникового экрана с требуемым уровнем ограничения аварийного тока.

3. Показано, что значение активного сопротивления сверхпроводникового экрана в нормальном состоянии может быть существенно снижено без ухудшения эффективности токоограничения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вершинин Ю. Н., Якимец И. В. Токоограничивающие выключатели трансформаторного типа с управляемыми сверхпроводниковыми экранами. — Электричество, 1985, № 3.
2. Петров Г. И. Электрические машины. Ч. I. — М.: Энергия, 1974.
3. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. — М.: Энергия, 1976.
4. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. — М.: Энергия, 1970.
5. Минц Р. Г., Рахманов А. Л. Неустойчивости в сверхпроводниках. — М.: Наука, 1984.
6. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. — М.: Мир, 1985.
7. AC magnetic instability in non-ideal type-II superconductors / M. Takeo, F. Jrie, T. Matsushita et al. — Cryogenics, 1981, vol. 21, N 2.
8. Лутидзе Ш. И., Наровлянский В. Г., Якимец И. В. Работа переключателей магнитного потока в токоограничивающем устройстве. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1980, № 6.
9. Meerovich B. M., Ovchinnikov I. I. Переходные процессы в цепях со сверхпроводниковыми токоограничивающими устройствами. — В кн.: Исследование электромагнитных процессов в устройствах со сплошными проводящими средами. — М.: Изд. АН СССР, 1983.

[17.06.91]

# Многоканальное построение преобразователей с промежуточным высокочастотным преобразованием

МЫЦЫК Г. С., канд. техн. наук, МИХЕЕВ В. В., инж., ФРИДМАН П. М., инж.

Московский энергетический институт, Самарский политехнический институт

**Введение.** Обостряющийся сырьевой и энергетический дефицит делает все более актуальным поиск эффективных энерго- и ресурсосберегающих принципов и приемов построения устройств энергетической электроники, обеспечивающих преобразование параметров располагаемой электроэнергии в заданные условиями конкретного применения параметры. Острота проблемы особенно возрастает в случаях, когда согласование уравнений входного и выходного напряжений невозможно без использования трансформаторного узла, а по крайней мере одна из частот, входная или выходная, является низкой (примерно ниже 100 Гц).

Широко известные приемы решения поставленной задачи, основанные на использовании промежуточного высокочастотного преобразования (ПВЧП), во многих случаях позволяют получить достаточно эффективные решения. Однако структурно-алгоритмические возможности этого пути в части расширения диапазона по мощности преобразующих устройств (ПУ) при использовании ограниченной по мощности, в частности транзисторной, элементной базы в настоящее время выявлены далеко еще не в полной мере.

Вместе с этим нельзя не обратить внимание также на проблему методологического характера, периодически возникающую при развитии любой области технических знаний. Дело в том, что новаторский и в основном индивидуальный характер творческой, в том числе изобретательской деятельности, опосредованной личностным восприятием индивидуума и уровнем его информированности, с неизбежностью приводит на определенных этапах к разнобою в терминологии и трактовке одних и тех же процессов, явлений или даже устройств. Это создает известные отрицательные издержки в развитии данной области. Естественным путем решения этой проблемы является периодическое упорядочение информации в данной области путем сжатия, концентрации ее до уровня концепций, принципов и приемов синтеза устройств с максимальной взаимоувязкой их с предысторией развития.

В данной статье реализуется такой подход. При этом за основу взято рассмотрение возможностей одного недостаточно описанного в технической литературе приема структурно-алгоритмической организации (САО) ПУ (см. например [1]), характеризуемого преобразованием исходного энергетического потока по частям с параллельным суммированием этих частей в выходной цепи. Такое суммирование в известных решениях иногда осуществляется с помощью так называемых уравнительных реакторов. В предлагаемых авторами решениях на основе использования иных представлений о процессах в таком электромагнитном узле (который, как оказалось, может выполнять более широкий круг функциональных задач) он

обозначается авторами как фильтр-трансформатор (ФТ) [2].

В [2] указанный прием суммирования распространен на другие классы ПУ и, получив там обобщающую формулировку, обозначен как концепция многоканального преобразования энергетического потока. Настоящая статья развивает используемую в [2] концепцию проектирования ПУ, поэтому здесь используется тот же, что и в [2] понятийно-терминологический базис.

Одновременно с решением задач САО в статье формулируются условия идеального (без искажений) преобразования энергетического потока и формируются модели выходных напряжений и тока ПУ, необходимые на этапе их параметрической оптимизации. При анализе принимается оправданная с точки зрения задач САО идеализация компонентов ПУ.

**Математическая модель квазиоднополосной модуляции.** Одним из универсальных (по своим функциональным возможностям) алгоритмов преобразования параметров электроэнергии является алгоритм квазиоднополосной модуляции (КОМ) [3].

Идеальная функциональная модель КОМ с учетом двух возможных типов суммирующей цепи (рис. 1) для  $j$ -й выходной фазы ПУ имеет следующий вид [3]:

$$U_{2j} = K_{\text{cx}} \sum_{i=1}^m U_{2(i)j} = K_{\text{cx}} \sum_{i=1}^m U_{1(i)j} \Psi_{m(i)}^3, \quad (1)$$

где  $U_{2(i)j} = U_{1(i)j} \Psi_{m(i)}^3$  —  $i$ -я часть преобразованного напряжения, реализуемая  $i$ -м модулятором;  $U_{1(i)j}$  — напряжение  $i$ -й фазы исходного (преобразуемого)  $m$ -фазного напряжения (на входе  $i$ -го модулятора);

$$U_{1(i)j} = U_{1m} \sin[\omega_1 t - (i-1)\beta_m - \beta_i]; \quad (2)$$

$U_{1m}$  — его амплитуда;  $\Psi_{m(i)}^3$  — эквивалентное модулирующее воздействие (ЭВМ), в обобщенной, компактной форме характеризующее САО модулятора;

$$\Psi_{m(i)}^3 = \sin[\omega_m t \pm (i-1)\beta_m]; \quad (3)$$

$\omega_1, \omega_m$  — угловые частоты исходного напряжения и ЭМВ;  $\beta_m$  — фазовый угол  $m$ -фазной системы;  $\beta_m = \pi/2$  при  $m=2$  и  $\beta_m = 2\pi/m$  при  $m > 2$ ;  $\beta_i$  — фазовый сдвиг, определяющий фазу выходного напряжения ПУ.

Схемный коэффициент  $K_{\text{cx}}$  равен либо числу  $m$  — в случае, когда операция суммирования (1) реализуется традиционным последовательным соединением выходов модуляторов (рис. 1, б), либо единице — в случае, когда реализуется рассматриваемый здесь нетрадиционный вид парал-

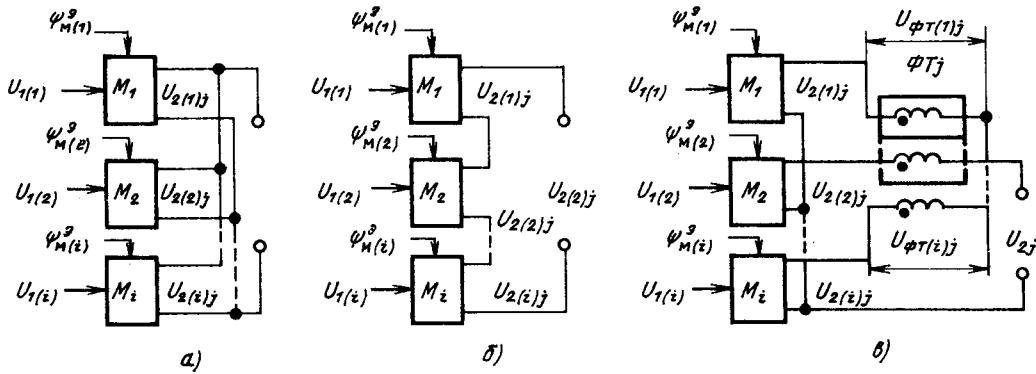


Рис. 1. Обобщенные структурные модели, иллюстрирующие концепцию многоканального преобразования с суммированием составляющих энергетического потока: а — в общем узле (СОУ); б — в общем контуре (СОК); в — в общем узле с помощью ФТ (СОУФТ); входные напряжения  $U_{1(i)}$  до суммирования должны быть гальванически развязаны (до или после модуляторов)

дельного их соединения через обмотки ФТ (рис. 1, в).

После подстановки (2) и (3) в (1) получим

$$U_{2j} = U_{2j}^0 - U_{2j}^n, \quad (4)$$

где  $U_{2j}^0$  — основная и  $U_{2j}^n$  — неосновная гармоники выходных напряжений  $j$ -й фазы;

$$U_{2j}^0 = \frac{1}{2} K_{cx} U_{1m} \cos[(\omega_1 \mp \omega_m)t \mp (i-1)\beta_m - \beta_j]; \quad (5)$$

$$U_{2j}^n = \frac{1}{2} K_{cx} U_{1m} \sum_{i=1}^m \cos[(\omega_1 \pm \omega_m)t \mp (i-1)\beta_m - \beta_j] = 0. \quad (6)$$

Знаки минус и плюс в (5) или плюс и минус в (6) между частотами  $\omega_1$  и  $\omega_m$  для основной и неосновной гармоник напряжения получаются из (1) в результате перемножения сигналов (2), (3) с согласным (или встречным) чередованием фаз и определяют режим вычитания (или суммирования) частот  $\omega_1$  и  $\omega_m$  соответственно [3]. Фазовый сдвиг  $\beta_j$  между гармониками выходного напряжения  $j$ -й и  $(j \pm 1)$ -й фаз обеспечивается относительным фазовым сдвигом систем (2) и (3) на соответствующий угол (при сохранении порядка чередования фаз систем).

Прокомментируем это положение с позиции физической сущности. Из анализа (6) следует, что составляющая  $U_{2j}^n = 0$ , как представляющая собой сумму векторов  $U_{2(i)j}$ , образующих симметричную  $m$ -лучевую звезду. Схемотехнически их взаимокомпенсация может быть осуществлена либо электрическим путем (рис. 1, б), либо электромагнитным (рис. 1, в). В последнем случае используется ФТ [2, 4], представляющий собой  $m$ -фазный магнитопровод с расположенной на его стержнях одной  $m$ -фазной обмоткой. Для  $m$ -фазной системы напряжений  $U_{2j}^n$  ФТ представляет собой как бы ловушку: он задерживает обусловленную ею  $m$ -фазную систему токов, которые встречают на своем пути значительное сопротивление  $m$ -фазного трансформатора в режиме холостого хода (х. х.) и в нагрузку не проходят.

Значение тока х. х., циркулирующего между модуляторами и ФТ, пропорционально потерям трансформатора в режиме х. х. и при необходимости, которая может возникать при небольших значениях напряжений задерживаемых гармоник, понижается до приемлемого уровня путем соответствующего увеличения числа витков обмоток ФТ. В ряде случаев это может быть рационально, так как частоты задерживаемых гармоник, на которые рассчитывается ФТ, на практике значительно выше частоты основной гармоники, а имеющее при этом место ухудшение массогабаритных показателей ФТ (из-за его переразмеривания) может быть компенсировано улучшением этого показателя в модуляторах, токовая нагрузка которых при этом снижается. Что касается основных гармоник в каждой из составляющих  $U_{2(i)j}$ , то они, будучи синфазными, проходят в нагрузку практически беспрепятственно.

В порядке систематизации заметим следующее. С учетом известных приемов САО ПЧ с КОМ [5], характеризуемых суммированием составляющих  $U_{2(i)j}$  по схеме либо в общем контуре (СОК) — рис. 1, б, либо в общем узле (СОУ) — рис. 1, а, рассматриваемый здесь прием, обладая свойствами обоих решений и создавая новый положительный эффект фильтрации высших гармоник, а также эффекты, о которых будет сказано ниже, должен быть классифицирован как новый прием. Обозначим этот вид суммирования составляющих энергетического потока как СОУФТ и рассмотрим другие его положительные свойства.

*Свойство токовой разгрузки каналов преобразующего тракта.* В структурах ПУ с СОУ [3, 5] — рис. 1, а в каждый данный момент работает только один из  $m$  каналов, пропуская через себя полный ток нагрузки. Это определяется соответствующим видом ЭМВ. Действующее значение тока  $I_{2(i)}$  через канал в долях от действующего значения тока нагрузки  $I_2$  при этом равно

$$U_{2(i) \text{ COU}} = \frac{1}{\sqrt{m}} I_2.$$

В структурах ПУ с СОУФТ в каждый данный момент работают все каналы. Поэтому токовая

загрузка каналов в этом случае в  $\sqrt{m}$  раз меньше:

$$U_{2(i)} = \frac{1}{m} I_2.$$

Это означает, что при одной и той же выходной мощности появляется возможность использования менее сильноточных ключевых элементов, расчетная мощность узлов и элементов ПУ, а также потери в них уменьшаются, а результирующие массогабаритные показатели ПУ с учетом введения ФТ в ряде случаев оказываются лучше.

*Свойство выравнивания токов между каналами.* Рассмотрим вначале простейший случай, когда  $m=2$ . Положим, что в результате технологического разброса параметров каналов ПУ  $U_{2(1)i}^o > U_{2(2)i}^o$ . Тогда для выходного напряжения  $j$ -й фазы ПУ по основной гармонике справедливы соотношения

$$\left. \begin{aligned} U_{2j}^o &= U_{2(1)j}^o - U_{\Phi T(1)j}^o \\ U_{2j}^o &= U_{2(2)j}^o + U_{\Phi T(2)j}^o \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $U_{2(1)j}^o, U_{2(2)j}^o$  — напряжения на выходах модуляторов  $M1$  и  $M2$  соответственно (по основной гармонике);  $U_{\Phi T(1)j}^o = U_{\Phi T(2)j}^o = U_{\Phi Tj}^o$  — напряжения на обмотках  $\Phi T_j$  (которые равны между собой благодаря равенству чисел витков обмоток ФТ  $W_{\Phi T(1)j} = W_{\Phi T(2)j} = W_{\Phi Tj}$ ) от разбаланса основных гармоник каналов.

Из (7) следует

$$U_{\Phi Tj}^o = \frac{1}{2}(U_{2(1)j}^o - U_{2(2)j}^o); \quad (8)$$

$$U_{2j}^o = \frac{1}{2}(U_{2(1)j}^o + U_{2(2)j}^o). \quad (9)$$

Таким образом, в соответствии с (7) — (9) ФТ обеспечивает выравнивание напряжений в каналах ПУ. Как следствие, выравниваются в них при этом и токи. Заметим, что это свойство может быть выведено из закона полного тока

$$I_{2(1)j} W_{\Phi T(1)j} = I_{2(2)j} W_{\Phi T(2)j} = \frac{1}{2} I_{2j}^o W_{\Phi Tj} \quad (10)$$

Необходимо отметить, что в этом простейшем варианте ФТ (при  $m=2$ ) рассмотренное его свойство в преобразовательной технике использовалось и раньше (для равномерного деления тока в параллельно работающих вентильных цепях). В соответствии с этой функцией ФТ обозначался как делитель тока. Известно также использование его как уравнительного реактора в 3-фазном [6], а для выпрямителей [1] — и в  $m$ -фазном варианте. Однако выявление всех свойств ФТ с описанием их физической сущности, распространение приема синтеза с использованием ФТ на ПУ различных классов для общего случая канальности  $m$ , формулировка в конечном счете приема суммирования в полном объеме совокупности его существенных признаков и рекомендаций по его применению для авторов оказались возможными лишь в результате нетрадиционного решения вышерассмотренной задачи суммирования частей энергетического потока для наиболее общего случая преобразования частоты по алгоритму КОМ.

Продолжая рассмотрение свойства выравнивания, можно убедиться, что при  $m=3$  по аналогии с (7) — (9) получается следующая система уравнений, характеризующая цепь суммирования:

$$\left. \begin{aligned} U_{2j}^o &= U_{2(1)j}^o - U_{\Phi T(1)j}^o \\ U_{2j}^o &= U_{2(2)j}^o - U_{\Phi T(2)j}^o \\ U_{2j}^o &= U_{2(3)j}^o - U_{\Phi T(3)j}^o \end{aligned} \right\} \quad (7a)$$

$$U_{\Phi T(1)j}^o + U_{\Phi T(2)j}^o + U_{\Phi T(3)j}^o = 0. \quad (11)$$

Из системы уравнений (7a) получим

$$\left. \begin{aligned} U_{\Phi T(1)j}^o &= \frac{1}{3}(2U_{2(1)j}^o - U_{2(2)j}^o - U_{2(3)j}^o); \\ U_{\Phi T(2)j}^o &= \frac{1}{3}(2U_{2(2)j}^o - U_{2(1)j}^o - U_{2(3)j}^o); \\ U_{\Phi T(3)j}^o &= \frac{1}{3}(2U_{2(3)j}^o - U_{2(1)j}^o - U_{2(2)j}^o). \end{aligned} \right\} \quad (8a)$$

В обобщенной для числа  $m$  форме эти системы могут быть представлены так:

$$U_{\Phi T(i)j}^o = U_{2(i)j}^o - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_{2(i)j}^o \quad (8b)$$

$$U_{2j}^o = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_{2(i)j}^o \quad (9a)$$

Для токов каналов при этом справедливо равенство

$$I_{2(1)j}^o = I_{2(2)j}^o = \dots = I_{2(m)j}^o = \frac{1}{m} I_{2j}. \quad (10a)$$

Если разбаланс напряжений  $U_{2(i)j}^o$  в каналах ПУ равен нулю, то и  $U_{\Phi T(i)j}^o = 0$ , и на основной гармонике ФТ не работает. За расчетные для него должны приниматься задерживаемые им, ближайшие по частоте и наибольшие по содержанию высшие гармоники (поскольку указанный разбаланс на практике обычно является незначительным, и наиболее сильным оказывается последнее условие). Для гарантированного исключения работы ФТ в области насыщения из-за возможного разбаланса напряжений каналов по основной гармонике необходимо соответствующим образом снижать его расчетную индукцию.

*Обобщенная математическая модель КОМ.* Рассмотрим далее более общий случай записи выходного напряжения  $j$ -й фазы, когда исходное напряжение  $U_{1(i)j}$  и ЭМВ  $\Psi_{m(i)}$  представляют собой полигармонические сигналы, а число  $m$  — нечетно и кратно выходной фазности  $N$ :

$$U_{1(i+j)} = U_{1m} \sum_{l=1}^{\infty} A_l \sin l \left[ \omega_m t - \frac{2\pi}{m} (i+j) \right], \quad (1a)$$

где  $i = \overline{1, m}; j = \overline{0, m-1}; l = 1, 3, 5, \dots$  — целое нечетное число;

$$\Psi_{m(i)}^o = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin k \left( \omega_m t - \frac{2\pi}{m} i \right), \quad (2a)$$

где  $k = 1, 3, 5, \dots$  — целое нечетное число;  $A_l, A_k$  — коэффициенты Фурье, определяемые формами напряжения  $U_{1(i)}$  и ЭМВ соответственно.

Тогда для выходного напряжения  $i$ -го модулятора  $j$ -й фазы получим

$$\begin{aligned} U_{2(i)j} &= U_{1(i+j)} \Psi_m^3(i) = \\ &= \frac{1}{2} U_{1m} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_l A_k \left\{ \cos \left[ (l\omega_1 - k\omega_m) t - \frac{2\pi}{m} l j - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{2\pi}{m} (l-k) i \right] - \cos \left[ (l\omega_1 + k\omega_m) t - \frac{2\pi}{m} l j - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{2\pi}{m} (l+k) i \right] \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Операцию суммирования (1) по  $i$  выполним на основе следующих рассуждений. Поскольку  $(l-k)$  — четное число, то при значениях  $l-k=2mn$ , где  $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty$ , составляющие нижних комбинационных боковых частот  $l\omega_1 - k\omega_m$  оказываются коллинеарными и после суммирования по схеме с СОК увеличивают свою амплитуду в  $m$  раз. Аналогичным образом, но при  $l+k=2mn$ , где  $n=1, 2, 3, \dots, \infty$ , суммируются и составляющие верхних комбинационных боковых частот  $l\omega_1 + k\omega_m$ . Для любых других сочетаний  $l$  и  $k$ , при которых  $l-k \neq 2mn$  и  $l+k \neq 2mn$  соответственно для нижних и верхних комбинационных боковых частот, образуются симметричные  $m$ -фазные системы напряжений, которые в результате эффекта взаимокомпенсации (в цепи суммирования) в нагрузку не попадают. Таким образом, выполнив суммирование по индексу  $i$ , мы от него освободились. Произведя далее вытекающие из изложенного замены дискретной переменной

$$\begin{aligned} l &\Rightarrow 2mn + k > 0; \\ l &\Rightarrow 2mn - k > 0; \end{aligned}$$

в соответствующих составляющих и утоля, что во временных аргументах возможны упрощения —

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{m} (2mn + k) j &\Rightarrow \frac{2\pi}{m} kj; \\ \frac{2\pi}{m} (2mn - k) j &\Rightarrow - \frac{2\pi}{m} kj, \end{aligned}$$

перейдем на основе (1) и (12) к общему выражению для выходного напряжения ПУ:

$$\begin{aligned} U_{2j} &= \frac{1}{2} K_{cx} U_{1m} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{(2mn+k)} A_k \cos \left\{ [2mn + \right. \\ &\quad \left. + k] \omega_1 - k\omega_m \right\} t - \frac{2\pi}{m} k j \Big\} - \frac{1}{2} K_{cx} U_{1m} \times \\ &\times \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{(2mn-k)} A_k \cos \left\{ [(2mn - k) \omega_1 + k\omega_m] t + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2\pi}{m} k j \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Полученное выражение может быть упрощено, если первую двойную сумму записать в виде двух составляющих — для  $n>0$  и  $n<0$ , и проанализировать их. Оказывается, что массивы гармоник, описываемые составляющей при  $n<0$  первой двойной суммы, и массивы гармоник, описы-

ваемые второй двойной суммой, имеют общее выражение с разницей лишь в ограничениях:  $k-2mn>0$  и  $2mn-k>0$ , которые образуют две соседние непересекающиеся области значений. С учетом этого можно снять указанные ограничения и вновь свернуть эти составляющие, получив более упорядоченное выражение в виде одной двойной суммы:

$$\begin{aligned} U_{2j} &= \frac{1}{2} K_{cx} U_{1m} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{(2mn+k)} A_k \times \\ &\times \cos \left\{ [(2mn+k) \omega_1 - k\omega_m] t - \frac{2\pi}{m} k j \right\}, \end{aligned} \quad (13a)$$

где  $n=0, \mp 1, \mp 2, \dots, \mp \infty$ ;  $k=1, 3, 5, \dots, \infty$ .

Известно, что в случае, когда фазное напряжение  $N$ -фазной генерирующей сети со структурой по схеме «звезда» является полигармоническим, спектральный состав напряжений на  $N$ -фазной нагрузке (без нулевого провода) как линейных, так и фазных в общем случае будет иным за счет отсутствия в них гармоник нулевой последовательности. Для определения спектра напряжения на нагрузке удобно и достаточно при принятых ограничениях найти линейное напряжение генерирующей сети:

$$\begin{aligned} U_{2(j+1),j} &= U_{2(j+1)} - U_{2j} = \\ &= K_{cx} U_{1m} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{(2mn+k)} A_k \sin \frac{\pi}{m} k (2j+1) \times \\ &\times \sin \left\{ [(2mn+k) \omega_1 - k\omega_m] t - \frac{\pi}{m} k (2j+1) \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из (14) следует, что в линейном напряжении и, следовательно, нагрузке отсутствуют комбинационные гармоники с номерами  $k$ , кратными  $m$ .

Напомним, что (13a), (14) получены для нечетных  $m$ . При четных  $m$  они будут отличаться от (13a), (14) лишь отсутствием сомножителя 2 перед произведением  $mn$  в коэффициенте  $A_{(2mn+k)}$  и во временных аргументах. Можно показать, что спектральные составы фазного (13a) и линейного (14) напряжений ПУ в этом случае будут одинаковыми, различаясь лишь известным коэффициентом  $\sqrt{3}$ . Напомним также, что коэффициент  $K_{cx}$  в выражениях (13a), (14) для структур ПУ с СОУФТ должен быть взят равным единице.

Массив высших комбинационных гармоник напряжения, задерживаемый ФТ (см. рис. 2, в), определяется аналогично (8б) как разность между выходным напряжением  $i$ -го модулятора  $U_{2(i)j}$ , определяемым выражением (12), и фазным выходным напряжением нагрузки  $U'_{2j}$ , определяемым на основе выражения (13a) с учетом в нем тех же особенностей, которые выявлены для линейного напряжения (14):

$$U_{\text{ФТ}(i)j} = U_{2(i)j} - \frac{1}{m} U'_{2j}. \quad (15)$$

*Частные модели (и случаи применения) КОМ.* Для примеров реализации инверторов на рис. 2,

*a, b* коэффициенты Фурье  $A_{(2mn+k)}$  и  $A_k$  имеют следующий вид

$$A_{(2mn+k)} = \frac{4}{\pi} \frac{\cos(2mn+k)\alpha_1}{(2mn+k)} \Big|_{m=3} = \frac{4 \cos(6n+k)\alpha_1}{\pi(6n+k)}; \quad (16)$$

$$A_k = \frac{4 \cos k\alpha_m}{\pi k} \text{ (на рис. 2, в } \alpha_m = 0). \quad (17)$$

Один из углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_m$  может быть использован для уменьшения искажений тока нагрузки, а другой для регулирования его значения. В принципе для минимизации упомянутых искажений регулирование можно осуществлять за счет одновременного изменения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_m$ .

Используемый алгоритм преобразования энергетического потока позволяет выбирать рабочую частоту трансформаторов  $TV_{(i)}$  (рис. 2, *a, б*) из условия минимизации массогабаритных показателей ПУ. Расчетная частота ФТ равна сумме частот  $\omega_1$  и  $\omega_m$ , в результате чего масса, привнесенная ФТ в ПУ незначительна. Отметим при этом еще, что габаритная (расчетная) мощность ФТ при прочих равных условиях вдвое меньше, чем у двухобмоточного трансформатора.

В примере ПУ на рис. 2, *a* предполагается, что  $ИЯ_{(i)}$  и модуляторы  $M_{(i)}$  выполнены по мостовой схеме. В решении на рис. 2, *б* с целью упрощения при реализации трехфазного выхода использован прием построения модуляторов по схеме со средней точкой во вторичных обмотках и с общими для  $j$ -х фаз  $m$ - или  $(m+1)$ -цепевыми коммутаторами, алгоритмы которых (в коде 0; 1) обозначены как  $\Psi_{m(i)}$  и  $\bar{\Psi}_{m(i)}$ . Взаимосвязь последних с ЭМВ  $\Psi_{m(i)}^3$  на рис. 2, *a, в* следующая:

$$\Psi_{m(i)}^3 = \Psi_{m(i)} - \bar{\Psi}_{m(i)},$$

где черта над  $\Psi_{m(i)}$  означает инверсию.

Увеличение мощности ПУ путем увеличения канальности может идти за счет как увеличения числа  $m$ , так и расчленения каждого  $i$ -го канала на несколько подканалов. При этом одновременно появляется возможность снижения искажений как в исходной системе напряжений  $U_{1(i)}$  (за счет соответствующего фазового сдвига напряжений подканалов и формирования на этой основе напряжений  $U'_{1(i)}$  с амплитудно-импульсной модуляцией — АИМ), так и в ЭМВ  $\Psi_{m(i)}^3$  (путем аналогичного расщепления модуляторов на подканалы с соответствующими фазовыми сдвигами их ЭМВ таким образом, чтобы образовывалось результирующее ЭМВ, имеющее форму сигнала с АИМ). Модуляторы подканалов при этом питают одинаковыми гальванически развязанными напряжениями  $U'_{1(i)}$ , а их выходы соединяют последовательно. Приближение сигналов  $U_{1(i)}$  и  $\Psi_{m(i)}^3$  к моногармоническим, как показано в начале статьи, приводит к уменьшению искажений преобразованного энергетического потока.

Для решения задачи синтеза ПУ, таким образом, можно использовать известные приемы аппроксимации гармонического сигнала на основе,

например, АИМ с последующим переходом к многоканальным структурам  $ИЯ_{(i)}$  и  $M_{(i)}$  на основе приемов декомпозиции этих аппроксимирующих сигналов на элементарные сигналы, реализуемые модуляторами с простейшей структурой [3, 5, 10].

Рассмотрим второй, имеющий практическое значение, случай, когда исходное напряжение  $U_{1(i)}$  представляет собой моногармонический сигнал. Наиболее полно он проанализирован в [3, 5]. Здесь ограничимся лишь записью спектров фазного и линейного выходных напряжений ПУ (которое, кстати, при оговоренных условиях относится уже к классу преобразователей частоты — ПЧ с непосредственной связью), используя принятую в настоящей статье логику вывода выражения и принятые обозначения:

$$U_{2j} = \frac{1}{2} K_{cx} U_{1m} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_{(2mn+1)} \cos \left\{ [(2mn+1)\omega_m - \omega_m - \omega_1] t - \frac{2\pi}{m} j \right\}; \quad (18)$$

$$U_{2(j+1),j} = K_{cx} U_{1m} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_{(2mn+1)} \times \\ \times \sin \frac{\pi}{m} \sin \left\{ [(2mn+1)\omega_m - \omega_1] t - \frac{\pi}{m} (2j+1) \right\}, \quad (19)$$

где коэффициент Фурье  $A_{(2mn+1)}$  определяемый формой ЭМВ, в простейшем случае равен (рис. 3, *г*)

$$A_{(2mn+1)} = \frac{4 \cos(2mn+1)\alpha_m}{\pi(2mn+1)}. \quad (16a)$$

С точки зрения улучшения массогабаритных показателей ПУ целесообразно использовать структуру с бестрансформаторным входом (рис. 3, *а*). Использование ее целесообразно при  $\omega_2 > \omega_1$ . Однако возможности повышения рабочей частоты трансформаторов здесь жестко ограничены функциональным соотношением  $\omega_2 = \omega_m - \omega_1$ . Кардинально решить эту задачу можно введением ПВЧП [7]. Для этого на основные ЭМВ всех модуляторов накладывают дополнительное ЭМВ  $\Psi_{vq}^3$  (имеющее вид меандра с единичной амплитудой и частотой  $\omega_{vq}$ ), а освобождение от него (после трансформации энергетического потока) осуществляют с помощью вводимого для этой цели демодулятора — ДМ (рис. 3, *а, б*). Функциональная модель, характеризующая процесс преобразования, в этом случае имеет вид (рис. 3, *г*)

$$U_{2j} = \sum_{i=1}^m U_{1(i)} \Psi_{m(i)}^3 \Psi_{vq}^3 = U_{2j}^{vq} \Psi_{vq}^3 = \sum_{i=1}^m U_{1(i)} \Psi_{m(i)}^3. \quad (1a)$$

Прием совмещения нескольких функций в одном узле широко используется в силовой преобразовательной технике, причем число этих функций может доходить до трех—четырех. Например, еще одна функция — функция регулирования напряжения, может быть реализована в модуляторах (широким или широтно-импульсным способом) на одной из частот  $\omega_m$ ,  $\omega_1$  либо  $\omega_{vq}$ . Причем, ис-

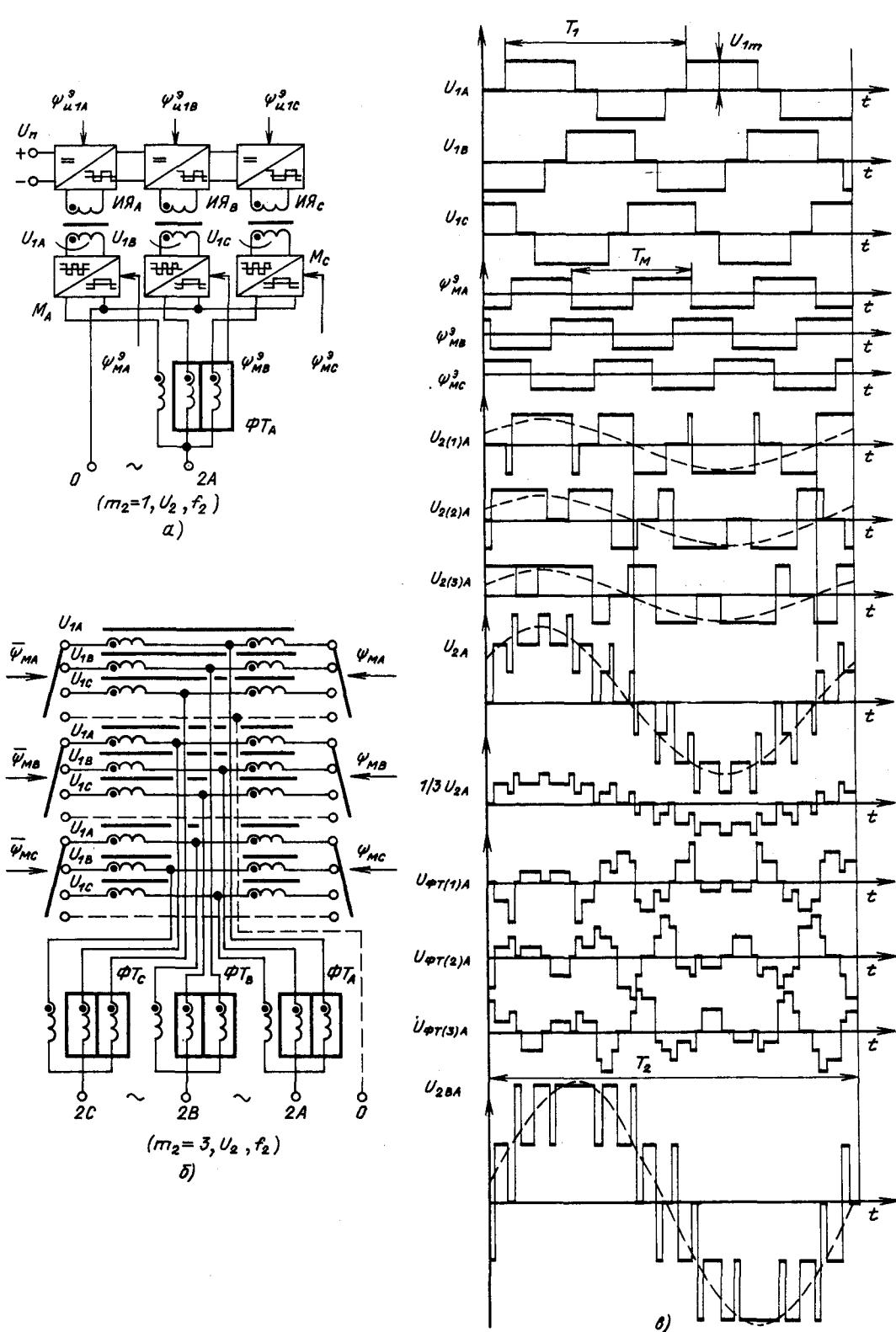


Рис. 2. Использование алгоритма КОМ для преобразования постоянного напряжения в квазисинусоидальное: блок-схема инвертора с СОУФТ в однофазном (а) и в трехфазном (б) вариантах, а также временные диаграммы, поясняющие их работу (в)

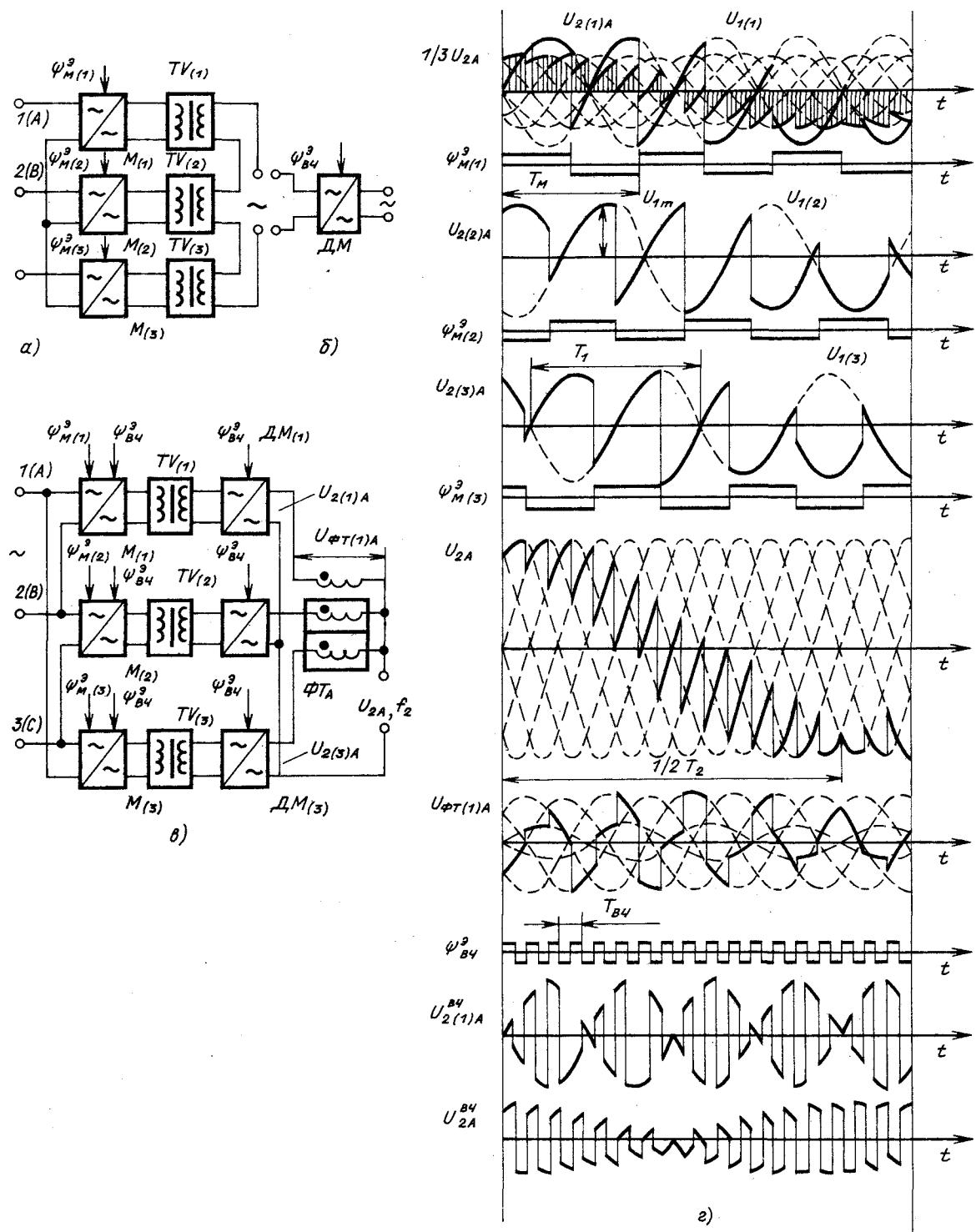


Рис. 3. Использование алгоритма КОМ для преобразования трехфазного напряжения одной частоты в однофазное напряжение другой частоты: блок-схема силовой части ПЧ с СОК без ПВЧП (а), с ПВЧП (б), ПЧ с СОУФТ с ПВЧП (в), а также временные диаграммы, поясняющие алгоритмы преобразования:  $U_{2A}$ ,  $1/3 U_{2A}$  — выходные напряжения для ПЧ с СОК и ПЧ с СОУФТ соответственно;  $U_{2(1)A}^{B4}$ ,  $U_{2A}^{B4}$  — напряжения на выходе  $M_{(1)}$  и на входе  $DM$  в ПЧ с СОК с ПВЧП (рис. 3, а, б)

пользуя, например, наиболее эффективную однополярную ШИМ (ОШИМ) по синусоидальному закону (с реализацией ее на основе вертикального принципа управления) в основном ЭМВ  $\Psi_{M(i)}^3$  на частоте, например  $\omega_{вч}$ , одновременно с функцией регулирования согласно модели (1) можно решать

и задачу улучшения спектрального состава не только выходного, но и входного токов. Последняя возможность вытекает из известного свойства обратимости ПЧ с КОМ, в том числе и из обратимости функциональной модели для (входных и выходных) токов, аналогичной модели для напряжений (1).

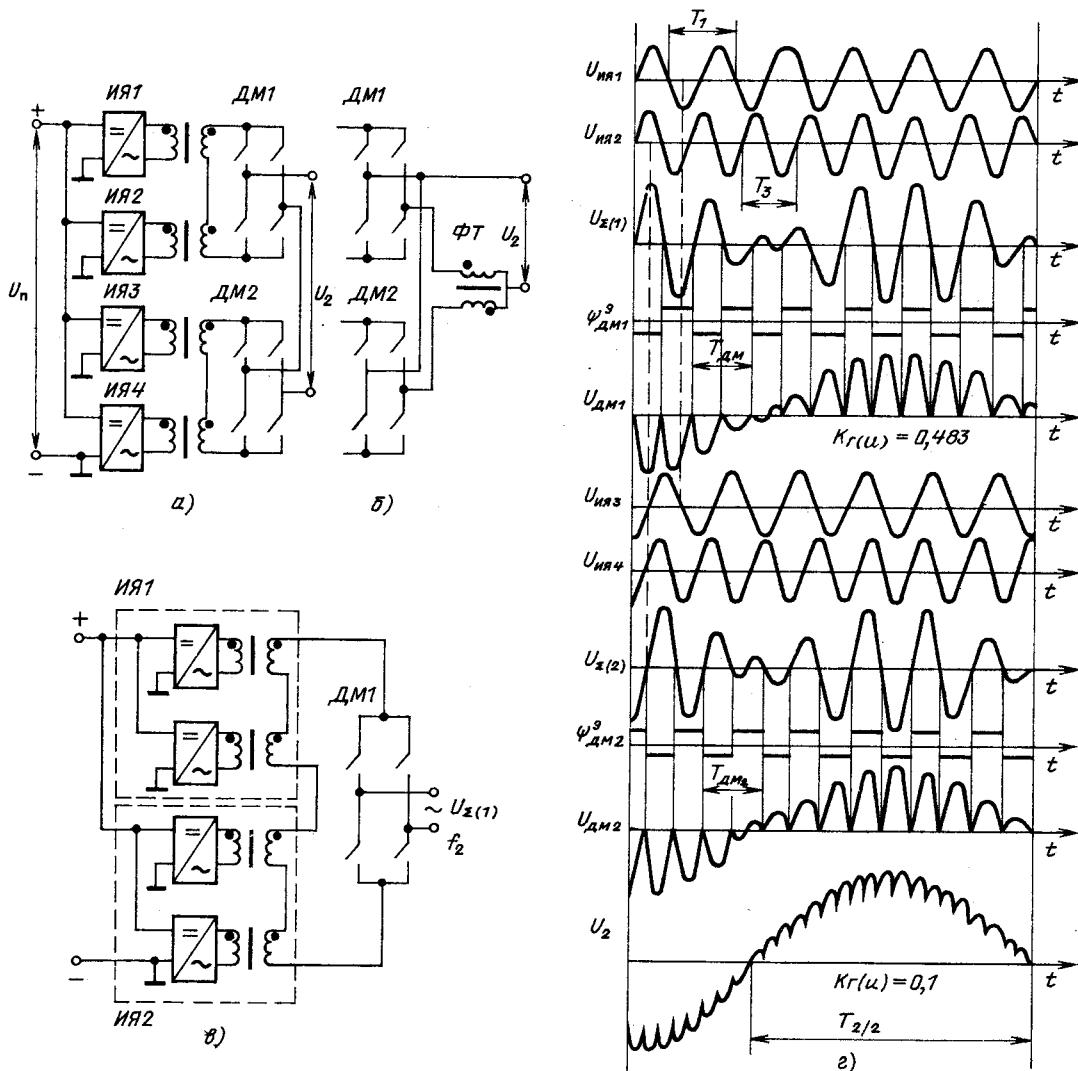


Рис. 4. Использование алгоритма суммирования двух разночастотных сигналов (СРЧС) при двухканальном преобразовании постоянного напряжения в квазинусоидальное: блок-схема силовой части в вариантах с СОУФТ (а) и с СОУФТ (б); выполнение силовой части канала при реализации приема векторного регулирования напряжения в инверторных ячейках ИЯ1 и ИЯ2 (в); г — временные диаграммы процессов, поясняющие алгоритм СРЧС (следует принять во внимание эквивалентность следующих сигналов  $U_{\text{з}i} \Leftrightarrow U_{1(i)}$ ,  $U_{\text{ДМ}i} \Leftrightarrow U_{2(i)}$ )

Нужно заметить, что с точки зрения решения этой последней задачи наличие ПВЧП (и, следовательно, ДМ) не является существенным (см. рис. 3, а). Тактовую частоту ШИМ при отсутствии ПВЧП выбирают исходя из желаемых спектров входного и выходного токов и частотных возможностей ключей ПУ.

В структуре ПЧ с СОУФТ на рис. 3, в возможности повышения качества преобразования (по входу и выходу) выше за счет полной (а не частичной, как на рис. 3, а, б) многоканальности преобразующего тракта и появляющейся благодаря этому возможности реализации заданных функций с помощью приема многофазного ПВЧП, характеризуемого, как известно, меньшими искажениями [2].

В порядке систематизации полезно заметить, что при синтезе ПЧ задачи малоискажающего преобразования по входу и по его выходу можно разделить. Для этого следует обратиться к тради-

ционной САО ПЧ, обозначаемой в преобразовательной технике как структура ПЧ со звеном постоянного тока. Характерным для нее является выполнение преобразования посредством двух последовательных (обычно между собой не взаимосвязанных) операций: выпрямления и инвертирования. При реализации каждой из них используют соответствующий арсенал приемов, обеспечивающих требуемое качество преобразования.

Поскольку выпрямление является частным случаем КОМ (имеющим место при равенстве частот  $\omega_1$  и  $\omega_m$  [2]), то при синтезе выпрямителя удобно использовать функциональную модель (1) — (6) и вытекающие из нее вышерассмотренные приемы синтеза в том числе с использованием ПВЧП. Используя эту концепцию, можно бесфильтровым путем получить требуемый уровень пульсаций выпрямленного напряжения при одновременном, сопутствующем (этому) уменьшении искажений потребляемого тока. Операция инвер-

тирования выпрямленного напряжения при этом возлагается на модулятор. Его синтез основывается на известных приемах САО АИ, обеспечивающих формирование напряжения заданных формы и качества (на основе модификаций ШИМ, АИМ и их комбинаций — АШИМ).

Заметим также, что расширение функциональных возможностей ПУ за счет информационного уплотнения их управляющих каналов является одной из современных тенденций развития силовой преобразовательной техники, стимулирующей улучшение частотных свойств ключевых элементов.

*Идеальная модель алгоритма формирования энергетического потока путем многоканального его преобразования и суммирования на двух разных частотах (СРЧС).* От вышерассмотренного алгоритма КОМ этот алгоритм отличается тем, что информация на формирование выходного энергетического потока проходит по двум  $m$ -фазным силовым разночастотным каналам [4, 8] (а не по одному  $m$ -фазному силовому и одному  $m$ -фазному информационному каналам). При этом выходная частота ПУ равна полуразности двух частот  $\omega_2 = 0,5|\omega_1 - \omega_3|$ , а не просто разности, как при КОМ ( $\omega_2 = |\omega_1 - \omega_m|$ , где  $\omega_m \leftrightarrow \omega_3$ ).

В отличие от известного одноканального способа реализации приема СРЧС [8] (причем в простейшем его частном варианте, что будет ясно из изложенного), здесь приводится идеальная и обобщенная по  $m$  модель, представляющая собой тот идеальный конечный результат, к которому в конечном счете должен стремиться разработчик, решая задачу малоискажающего преобразования. Руководствуясь ею, он может синтезировать компромиссные решения, обеспечивающие рациональное (на заданной критериальной основе) приближение к идеальному конечному результату.

Выходное напряжение ПУ с алгоритмом СРЧС в общем виде для  $j$ -й выходной фазы определяется той же моделью (1), что и при алгоритме КОМ, однако вид сигналов  $U_{1(i)j}$  и  $\Psi_{m(i)j}^3$  здесь принципиально иной.

$$\begin{aligned} U_{1(i)j} &\Leftrightarrow U_{\Sigma(i)j} = U_{1(i)j} + U_{3(i)j} = U_{1m} \times \\ &\quad \times \sin [\omega_1 t - (i-1)\beta_m - \beta_j] + U_{1m} \times \\ &\quad \times \sin [\omega_3 t - (i-1)\beta_m] = \\ &= 2U_{1m} \cos \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_3)t - \frac{1}{2}\beta_j \right] \times \\ &\quad \times \sin \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_3)t - (i-1)\beta_m - \frac{1}{2}\beta_j \right], \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{m(i)j}^3 &\Leftrightarrow \Psi_{dm(i)j}^3 = \\ &= \sin \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_3)t - (i-1)\beta_m - \frac{1}{2}\beta_j \right], \end{aligned} \quad (21)$$

где значение  $\beta_m$  такое же, как в (2), (3), а  $m \geq 2$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_3$  — угловые частоты суммируемых напряжений  $U_{1(i)j}$  и  $U_{3(i)j}$   $i$ -го канала  $j$ -й фазы ПУ (рис. 4, г).

После подстановки (20), (21) в (1) и простых преобразований получим модель идеального пре-

образования:

$$\begin{aligned} U_{2j} &= \sum_{i=1}^m U_{\Sigma(i)j} \Psi_{dm(i)j}^3 = U_{2j}^0 + U_{2j}^s = \\ &= K_{cx} U_{1m} \cos \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_3)t - \frac{1}{2}\beta_j \right] - \frac{1}{2} U_{1m} \sum_{i=1}^m \times \\ &\quad \times \cos \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 + 3\omega_3)t - (i-1)\beta_m - \frac{1}{2}\beta_j \right] - \\ &- \frac{1}{2} U_{1m} \sum_{i=1}^m \cos \left[ \frac{1}{2}(3\omega_1 - \omega_3)t - (i-1)\beta_m - \frac{3}{2}\beta_j \right] = \\ &= K_{cx} U_{1m} \cos \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_3)t - \frac{1}{2}\beta_j \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

Как видно, структурно модель (22) аналогична модели (4) и, следовательно, на ПУ данного класса распространяются все приемы синтеза неидеальных ПУ (т. е., ПУ с квазисинусоидальным выходным напряжением), рассмотренные для ПЧ с алгоритмом КОМ (которые обеспечивают требуемое его приближение к моногармоническому сигналу).

В зависимости от условий применения входные напряжения  $U_{1(i)j}$ ,  $U_{3(i)j}$  могут генерироваться либо статическими преобразователями (инверторами напряжения с ШИМ, АИМ, АШИМ, резонансными инверторами тока), либо электромеханическими преобразователями. В качестве ЭМВ  $\Psi_{dm(i)j}^3$ , реализуемых здесь демодуляторами —  $DM_{(i)}$  (рис. 4), в простейшем случае может использоваться меандр — рис. 4, г (самая грубая аппроксимация гармонического сигнала). Ближайшим способом повышения качества преобразования является снижение искажений ЭМВ за счет введения в меандр паузы  $\pi/3$  между его полуволнами или же введения в него ОШИМ по трапецидальному или синусоидальному законам. О приемах реализации в ЭМВ АИМ уже было сказано выше (см. еще [10]).

Регулирование уровня выходного напряжения ПУ здесь может осуществляться либо в  $DM_{(i)}$  на основе способов ОШИР или ОШИМ, либо в генерирующем звене, например, на основе использования (в принципе неискажающего) приема векторного регулирования — путем расщепления каждого из генерирующих каналов обеих частот на два подканала с изменяемым относительно друг друга фазовым сдвигом их напряжений — рис. 4, в.

В том случае, когда ЭМВ является полигармоническим сигналом, спектральный состав выходного напряжения ПУ с СРЧС, как и при КОМ [3] зависит от соотношения частот  $\omega_3/\omega_1 = a$  и выходной частоты  $\omega_2$ . Для количественной характеристики этой взаимосвязи удобно использовать кратность заполнения периода выходной частоты импульсами суммарного напряжения  $U_{\Sigma(i)}$ , имеющими частоту  $0,5(\omega_1 + \omega_3)$ .

$$\xi = \frac{0,5(\omega_1 + \omega_3)}{0,5|\omega_1 - \omega_3|} = \frac{1+a}{|1-a|}. \quad (23)$$

Ограничимся здесь лишь иллюстрацией зависимостей коэффициента гармоник напряжения

$K_{r(u)}$  от канальности  $m$  и коэффициента гармоник тока  $K_{r(i)}$ , как частотно зависимого показателя, от кратности  $\xi$  (рис. 5) для случаев, представленных на рис. 4, г, а также сошлемся на [9], где эти же результаты получены совершенно иным методом применительно к не имеющему, казалось бы, на первый взгляд отношения к рассматриваемому здесь классу ПУ техническому решению. Однако полная идентичность моделей выходного напряжения говорит об имеющейся глубокой их связи и, следовательно, об имеющейся возможности логического перехода от одного решения к другому.

**Выводы.** Создание конкурентоспособных устройств энергетической электроники (удовлетворяющих требованиям техники новых поколений) с неизбежностью требует оперативного осмысления и использования накопленного изобретательского потенциала в принципах и приемах решения структурно-алгоритмических задач, характеризующих первый, наиболее важный в процедуре проектирования этап — этап формирования технического облика устройства. Важнейшим и наиважнейшим шагом в решении этой проблемы является создание предпосылок и условий для перехода от во многом случайного перебора (и оценки) решений при выборе наиболее рационального из них к целенаправленному формализовано-эвристическому их синтезу.

Использованные в статье подход, концепция многоканального преобразования, а также идеальные модели алгоритмов КОМ и СРЧС, определяющие направление синтеза ПУ, концентрируют и упорядочивают информацию, необходимую для проектирования, и вносят определенный вклад в решение вышеназванной проблемы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей.— М.: Наука, 1970.
2. Мызык Г. С. Основы теории структурно-алгоритмического синтеза источников вторичного электропитания.— М.: Изд. МЭИ, 1989.
3. Мызык Г. С. Преобразование параметров многофазных сигналов на основе принципа квазиднополосной модуляции.— Электричество, 1986, № 11.

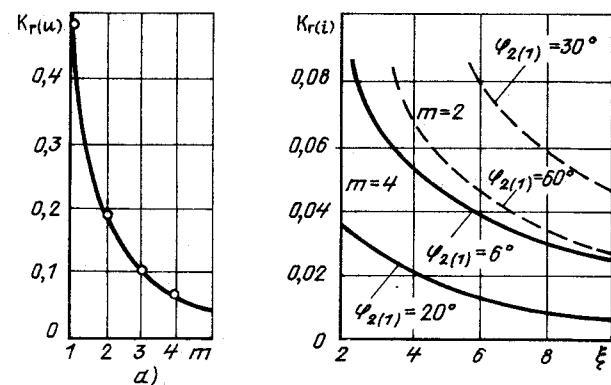


Рис. 5. Показатели качества преобразованного энергетического потока при алгоритме СРЧС: зависимости коэффициентов гармоник выходного напряжения  $K_{r(u)}$  от канальности  $m$  (а) и выходного тока  $K_{r(i)}$  от параметров  $\xi$ ,  $m$  и угла нагрузки по основной гармонике  $\varphi_{2(1)}$  (б)

4. А. с. № 1443103 (СССР). Преобразователь постоянного напряжения в квазисинусоидальное напряжение / Г. С. Мызык, П. М. Фридман, Г. А. Саркисов. Опубл. в Б. И., 1988, № 45.

5. Мызык Г. С., Сенько В. И., Скобченко В. М. Построение, анализ и возможности применения преобразователей частоты с квазиднополосной модуляцией.— В кн.: Автоматизация управления организационными и техническими системами.— Томск: Изд. Томского гос. университета, 1979.

6. Джюджи Л., Пелли Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты.— М.: Энергоатомиздат, 1983.

7. А. с. № 843134 (СССР). Преобразователь частоты с квазиднополосной модуляцией / Г. С. Мызык, В. В. Михеев.— Опубл. в Б. И., 1981, № 24.

8. Полупроводниковые преобразователи модуляционного типа с промежуточным звеном высокой частоты / В. Е. Тонкаль, Л. П. Мельничукук, А. В. Новосельцев, Ю. И. Дыхненко.— Киев: Наукова думка, 1982.

9. Коробан Н. Т., Мызык Г. С., Пикулин В. П. Метод анализа выходного тока преобразователя частоты амплитудно-модуляционного типа.— Электротехника, 1975, № 8.

10. Мызык Г. С. Возможности совершенствования преобразователей частоты с квазиднополосной модуляцией.— В кн.: Электромеханические системы и устройства автоматического управления.— Томск: изд. Томского гос. университета, 1987.

[08.04.91]

# Трехфазно-однофазные обмотки для совмещенных электрических машин

ПОПОВ В. И., доктор техн. наук

Нижний Новгород

Электрические совмещенные машины переменного тока с двумя разнополюсными рабочими полями в магнитопроводе находят все более широкое применение в современном электрооборудовании в качестве (рис. 1) трехфазных ферромагнитных статических устройств с вращающимся магнитным полем (преобразователи частоты и числа фаз, управляемые дроссели и реакторы с синусоидальным током), синхронных машин с системой возбуждения от третьей гармонической магнитного поля, одномашинных преобразователей частоты и др. [1—2]. Конструкция таких электрических машин и устройств существенно упрощается при применении в них электрически совмещенных обмоток [1—7], выполняющих одновременно функции двух раздельных разнополюсных обмоток при меньшем расходе медного провода и изоляции.

Трехфазно-однофазные совмещенные обмотки, выполняемые на статоре, соединяются в две параллельные трехфазные звезды (рис. 1) с трехфазными зажимами  $C_1, C_2, C_3$  для полюсности  $p_1$  и дополнительными однофазными зажимами  $01-02$  для полюсности  $p_2 \neq p_1$  от нулевых точек звезд. Разнополюсные зажимы совмещенной обмотки должны быть электромагнитно независимыми, т. е. поле одной полюсности ( $p_1$  и  $p_2$ ) не должно наводить э.д.с. на зажимах фаз для другой полюсности ( $01-02$  или  $C_1, C_2, C_3$ ), что является одним из основных условий электромагнитной совместности совмещенной электрической машины. Для выполнения этого условия катушки совмещенной обмотки часто получаются разношаговыми и разновитковыми, вследствие чего для такой обмотки непригодны методики и рекомендации по расчету электромагнитных параметров, применяемые для обычных обмоток с равновитковыми катушками.

В статье исследуются электромагнитные параметры разнополюсных цепей трехфазно-однофазных совмещенных обмоток с соотношением

чисел пар полюсом  $p_2=3p_1$  при целом числе пазов на полюс и фазу  $q=z/6p_1$ , характеризуемых высокой степенью эффективности и технологичности; некоторые варианты схем обмотки при дробном значении  $q$  исследованы в [7].

В общем случае такие совмещенные обмотки выполняются двухслойными в  $z=6p_1q$  пазах из  $6p_1$  катушечных групп с  $q$  концентрическими катушками, разбитыми в каждой группе на три подгруппы: первую подгруппу образуют  $N$  соседних катушек, включая наружную, вторую подгруппу —  $N'$  соседних катушек, включая внутреннюю, а третью подгруппу — остальные  $N''=q-(N+N')$  катушки группы, и при этом в каждой группе катушки подгрупп включены последовательно,  $N \leq N' \leq ent(q/2)$ , а числа витков катушек подгрупп неодинаковы. Указанные подгруппы катушек соединяются в каждой фазе последовательно: первыми подгруппами — в ветвь первой звезды, вторыми подгруппами — в ветвь второй звезды, а третьими подгруппами — в одну или две дополнительные ветви, начала которых образуют зажим фазы для полюсности  $p_1$ , а их концы соединены вместе с началами ветвей звезд фазы, причем подгруппы катушек четных групп включаются в ветвях встречно относительно подгрупп катушек нечетных групп; номера катушечных групп соответствуют первой, второй, третьей фаз определяются рядами  $1+3c, 3+3c, 5+3c$ , где  $c=0, 1, 2, \dots, (2p_1-1)$ . В частных случаях в обмотке может отсутствовать третья подгруппа ( $N''=q-N-N'=0$ ), а катушки подгрупп могут быть равновитковыми.

Трехфазно-однофазные обмотки рассматриваемого вида выполняются с шагами катушек по пазам

$$\left. \begin{aligned} y_{\text{п.к}} &= 3q + 1 - 2k; \\ y_{\text{п.н}} &= 3q - 1; \quad y_{\text{п.в}} = q + 1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $k = 1 \div q$  — номер катушки в катушечной

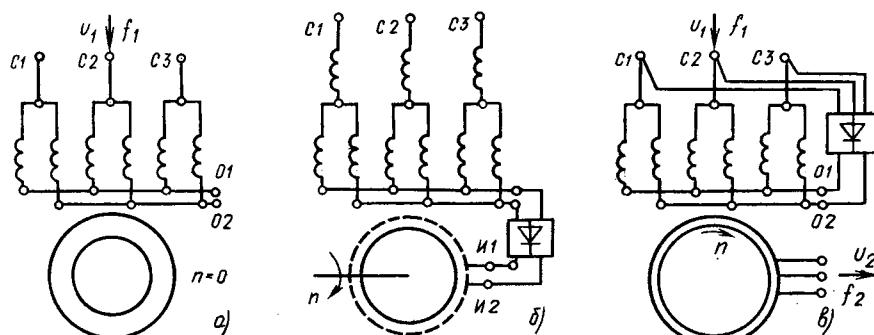


Рис. 1. Электрические схемы совмещенных электрических машин переменного тока с трехфазно-однофазной обмоткой на статоре: трехфазных ферромагнитных статических управляемого реактора или преобразователя (урогителя) частоты с вращающимся магнитным полем (а); синхронной машины с системой возбуждения от третьей гармонической магнитного поля (б); одномашинного асинхронного преобразователя частоты (в)

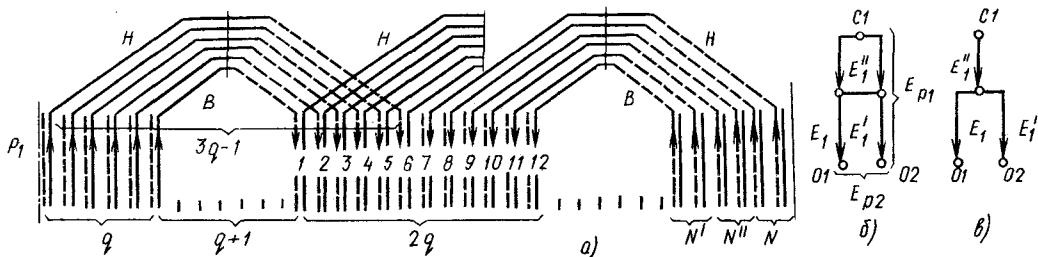


Рис. 2. Формирование фазы двухслойной трехфазно-однофазной совмещенной обмотки при  $p_1/p_2=1/3$  и  $q=6$  (а); диаграммы э. д. с. фазы при соединении третьих подгрупп катушек в две (б) и одну (в) дополнительную ветвь

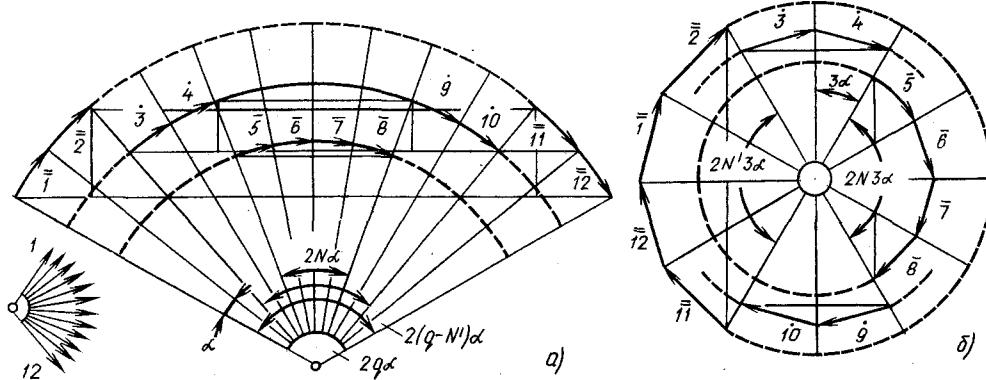


Рис. 3. Суммирование векторов э. д. с. катушечных сторон подгрупп фазы при  $N=N'$  и числах витков катушек группы в соотношении  $xw_k:w_k:(2-x)w_k$  для полюсности  $p_1=1$  (а) и  $p_2=3$  (б)

группе;  $y_{\text{н.в}}$  и  $y_{\text{н.в}}$  — шаги наружной ( $k=1$ ) и внутренней ( $k=q$ ) катушек группы.

Для обмотки с шагами катушек по (1) катушечные стороны верхнего и нижнего слоев двух групп фазы, соответствующих одной паре полюсов полюсности  $p_1$ , расположены в  $2q$  соседних пазах (рис. 2, а;  $q=6$ ) и им соответствуют звезды э.д.с. с  $2q$  векторами, смещенные на углы  $\alpha=\pi/3q$  для полюсности  $p_1=1$  и  $3\alpha=\pi/q$  для полюсности  $p_2=3$ . На диаграммах э.д.с. фазы (рис. 2, б и в) векторы  $E_1$ ,  $E'_1$ ,  $E''_1$  соответствуют подгруппам первой, второй, третьей, а  $E_{p1}$  и  $E_{p2}$  — соответственно э.д.с. фазы для полюсности  $p_1$  и  $p_2$ ; для обмотки с диаграммой по рис. 2, в при одинаковой с рис. 2, б э.д.с.  $E''_1$  число витков катушек третьих подгрупп вдвое меньше, чем для обмотки с диаграммой по рис. 2, б:

Если в верхнем слое пазов  $1, 2, \dots, q$  расположены катушечные стороны одной группы с номерами катушек в последовательности  $k=1, 2, \dots, q$ , то в нижний слой тех же пазов попадают катушечные стороны другой группы с номерами катушек в обратной последовательности  $k'=q, \dots, 2, 1$  (см. рис. 2, а). Следовательно, при одинаковом числе витков  $2w_k$  в каждом пазу  $N'$  катушек второй подгруппы должны содержать по  $(2-x)w_k$  витков,  $N$  катушек первой подгруппы и  $(N'-N)$  катушек третьей подгруппы — по  $xw_k$  витков, а остальные катушки группы — по  $w_k$  витков, где значение  $x$  должно определяться из условия равенства для полюсности  $p_1$  э.д.с. первых и вторых подгрупп, т. е.  $E_1=E'_1$ ; при четном значении  $q$  число

катушек в группе с  $xw_k$  и  $(2-x)w_k$  витками может быть одинаковым и равным  $q/2$ .

Суммирование э.д.с. катушек подгрупп фазы для полюсностей  $p_1$  и  $p_2=3p_1$  в соответствии с рис. 2, а показано на рис. 3, а, б — 5, а, б в зависимости от соотношения между  $N$  и  $N'$  чисел катушек в первой и второй подгруппах, где номера векторов э.д.с.  $(1 \div 2q)$  размечены сверху значками (—), (=), (·) по принадлежности их соответственно первым, вторым, третьим подгруппам. По рис. 3, а — 4, а при  $N''=q-2N'$  катушках третьих подгрупп с  $w_k$  витками и  $N \leq N'$  для полюсности  $p_1=1$  определяются:

э.д.с.  $E_1$  первых подгрупп (сумма векторов 5, 6, 7, 8 на рис. 3, а и 6, 7, 8 на рис. 4, а)

$$E_1=2R' \sin(N\alpha)=xw_k \sin(N\alpha)/\sin(\alpha/2), \quad (2)$$

где  $2R' \sin(\alpha/2)=xw_k$ ;

э.д.с.  $E_1$  вторых подгрупп (сумма векторов 1, 2, 11, 12 на рис. 3, а и 4, а)

$$E_1=2R'' [\sin(q\alpha)-\sin(q-N')\alpha]=$$

$$=(2-x)w_k [\sin(q\alpha)-\sin(q-N')\alpha]/\sin(\alpha/2), \quad (3)$$

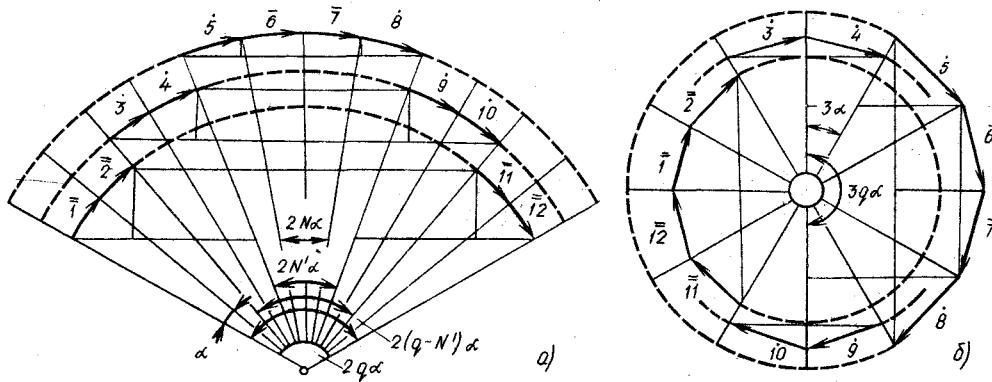
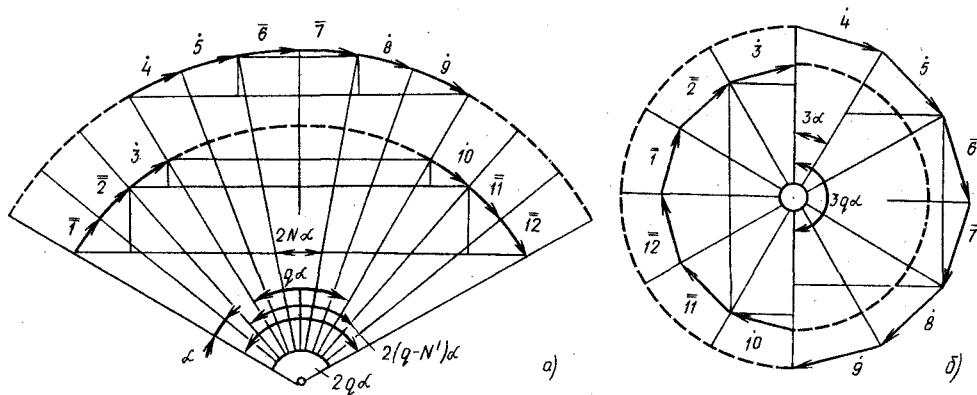
где  $2R'' \sin(\alpha/2)=(2-x)w_k$ .

Из условия равенства э.д.с. первых и вторых подгрупп  $E_1=E'_1$  следует

$$x \sin(N\alpha)=(2-x) [\sin(q\alpha)-\sin(q-N')\alpha],$$

откуда определяется значение  $x$  из соотношения  $(2-x)/x=\sin(N\alpha)/[\sin(q\alpha)-\sin(q-N')\alpha]$ . (4)

Э.д.с.  $E''_1$  третьих подгрупп определяется суммой векторов 3, 4, 9, 10 по рис. 3, а и 3, 4, 5, 8, 9, 10 по рис. 4, а. Так как сумма э.д.с.  $(E_1+E'_1)/2$  по

Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но при  $N < N'$  для четных и нечетных значений  $q$ Рис. 5. То же, что и на рис. 3, но при  $N < N'$  для четных значений  $q$  и числовых витков катушек группы в соотношении  $xw_k : (2-x)w_k$ 

$$\begin{aligned}
 (2)-(3) \text{ с учетом (4) равна} \\
 (E_1 + E'_1)/2 = xw_k \sin(N\alpha)/\sin(\alpha/2) = E_1, \\
 \text{то э.д.с. фазы } E_{p1} \text{ определяется выражением} \\
 E_{p1} = E''_1 + (E_1 + E'_1)/2 = \\
 = w_k \{x[\sin(N\alpha) + \sin(N'\alpha)] + \\
 + \sin(q-N')\alpha - \sin(N'\alpha)\}/2 \sin(\alpha/2) = \\
 = w_k \{(2-x)\sin(q\alpha) + (x-1)[\sin(q-N')\alpha + \\
 + \sin(N'\alpha)]\}/2 \sin(\alpha/2). \quad (5)
 \end{aligned}$$

Число витков фазы для полюсности  $p_1$  равно  $w_{p1} = w_k q$ , тогда из (5) после преобразований при  $\sin(q\alpha/2) = 1/2$  и  $\cos(q\alpha/2) = \sqrt{3}/2$  обмоточный коэффициент для полюсности  $p_1$  записывается в виде:

$$\begin{aligned}
 k_{ob,p1} = E_{p1}/w_{p1} = k_{pp1}k_{yp1} = \\
 = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \sin(\alpha/2)} [(2-x)\sqrt{3}/2 + \\
 + (x-1)\cos(q-2N')\alpha/2], \quad (6)
 \end{aligned}$$

где расчетные коэффициенты распределения  $k_{pp1}$  и укорочения  $k_{yp1}$  равны:

$$\left. \begin{aligned}
 k_{pp1} = \sin(q\alpha/2)/q \sin(\alpha/2) = 0.5/q \sin(\alpha/2); \\
 k_{yp1} = (2-x)\sqrt{3}/2 + (x-1)\cos(q-2N')\alpha/2.
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

По рис. 5, а для обмотки с четным значением  $q$  при  $q/2$  катушках групп с  $xw_k$  и  $(2-x)w_k$  витками и  $N < N'$  для полюсности  $p_1$  аналогично предыдущему расчету определяются:

$$\begin{aligned}
 E_1, E'_1, (2-x), x — по выражениям (2) — (4); \\
 E_{p1} = w_k \{x[\sin(q\alpha/2) + \sin(N\alpha)] + \\
 + (2-x)[\sin(q-N')\alpha - \sin(q\alpha/2)]\}/2 \sin(\alpha/2), \quad (8)
 \end{aligned}$$

откуда после преобразований с учетом (4) определяется обмоточный коэффициент

$$\begin{aligned}
 k_{ob,p1} = E_{p1}/q w_k = k_{pp1}k_{yp1} = \\
 = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \sin(\alpha/2)} [(2-x)\sqrt{3}/2 + (x-1)], \quad (9)
 \end{aligned}$$

где коэффициент распределения  $k_{pp1}$  определяется по (7), а расчетный коэффициент укорочения равен

$$k_{yp1} = (2-x)\sqrt{3}/2 + (x-1). \quad (10)$$

Для обмотки с заданными значениями  $q \geq 2$  и при принятых  $N, N'$  определяются значения  $x$  по (4),  $k_{pp1}, k_{yp1}, k_{yp1}'$  — по (6) — (7) или (9) — (10), после чего вычисляется расчетное укорочение шага катушек для полюсности  $p_1$

$$\beta_1 = y_{p,p} 2p_1/z = \frac{2}{\pi} \arcsin(k_{yp1}). \quad (11)$$

Для частного случая при  $x=1$  из (7) и (10) значение коэффициента укорочения равно  $k_{yp1}' = \sqrt{3}/2$ , что соответствует обычной трехфаз-

ной двухслойной обмотке со средним шагом катушек по (1)  $y'_{\text{п.ср}}=2q$  и  $\beta'_1=2/3$ , выполненной с полюсностью  $p_1$  в тех же пазах.

Аналогичным образом по рис. 3, б — 5, б для полюсности  $p_2=3p_1$  определяются э.д.с. первых и вторых подгрупп катушек

$$\begin{aligned} E_3 &= x\omega_k \sin(N3\alpha) / \sin(3\alpha/2); \\ E'_3 &= (2-x)\omega_k \sin(N'3\alpha) / \sin(3\alpha/2), \end{aligned}$$

откуда с учетом (4) находится э.д.с. фазы  $E_{p2}$  для полюсности  $p_2$

$$E_{p2}=E_3+E'_3=\omega_k [x\sin(N3\alpha)+\\+(2-x)\sin(N'3\alpha)]/\sin(3\alpha/2). \quad (12)$$

Так как число витков  $w_{p2}$  для полюсности  $p_2$  между зажимами 01—02 совмещенной обмотки равно

$$w_{p2}=2\omega_k [2N'-x(N'-N)], \quad (13)$$

то из (12) определяется обмоточный коэффициент для полюсности  $p_2$  в виде  $k_{\text{об}p2}=E_{p2}/w_{p2}=k_{pp2}k_{yp2}$ , где расчетные коэффициенты распределения и укорочения равны

$$k_{pp2}=\frac{\sin(N+N')3\alpha/2}{(N+N')\sin(3\alpha/2)}; \quad (14)$$

$$k_{yp2}=\frac{(N+N')[x\sin(N3\alpha)+(2-x)\sin(N'3\alpha)]}{2[2N'-x(N'-N)]\sin(N+N')3\alpha/2} \quad (15)$$

По значению  $k_{yp2}$  из (15) определяется расчетное укорочение шага катушек для полюсности  $p_2$

$$\beta_3=\frac{2}{\pi}\arcsin(k_{yp2}). \quad (16)$$

Для частного случая при  $x=1$  из (15) следует, что

$$k'_{yp2}=\cos(N'-N)3\alpha/2 \text{ и } \beta'_3=1-(N'-N)/q. \quad (17)$$

Э.д.с.  $E''_3$  третьих подгрупп для полюсности  $p_2=3p_1$ : по рис. 3, б равна нулю (сумма векторов 3, 4, 9, 10); по рис. 4, б (сумма векторов 5, 8)

$$E''_3=x\omega_k [\sin(N'3\alpha)-\sin(N3\alpha)]/2\sin(3\alpha/2);$$

$$\begin{aligned} k''_{obp2} &= E''_3/w''_{p2} = \\ &= \frac{x[\sin(N'3\alpha)-\sin(N3\alpha)]}{2[q-2N'+x(N'-N)]\sin(3\alpha/2)}, \end{aligned}$$

где число витков катушек третьих подгрупп  $w''_{p2}$  с учетом (13) равно

$$\begin{aligned} w''_{p2} &= (2q\omega_k-w_{p2})/2= \\ &= \omega_k[q-2N'+x(N'-N)]; \end{aligned}$$

по рис. 5, б (сумма векторов 3, 4, 5, 8, 9, 10)

$$\begin{aligned} E''_3 &= \omega_k \{ x[\sin(q3\alpha/2)-\sin(N3\alpha)]- \\ &- (2-x)[\sin(q3\alpha/2)- \\ &- \sin(N'-\alpha)] \} / 2\sin(3\alpha/2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k''_{obp2} &= E''_3/w''_{p2} = \\ &= \frac{x[1-\sin(N3\alpha)]\tau-(2-x)[1-\sin(N'3\alpha)]}{2[q-2N'+x(N'-N)]\sin(3\alpha/2)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{где } w''_{p2} &= \omega_k \left[ \left(\frac{q}{2}-N\right)x + \left(\frac{q}{2}-N'\right)(2-x) \right] = \\ &= \omega_k [q-2N'+x(N'-N)]. \end{aligned}$$

Таким образом, при  $N \neq N'$  в дополнительных ветвях фаз совмещенной обмотки наводятся э.д.с.  $E''_3$  полем с полюсностью  $p_2=3p_1$ , так как при этом для катушек третьих подгрупп  $k''_{obp2} \neq 0$ , то на линейных  $2p_1$  — полюсных зажимах  $C1, C2, C3$  эта э.д.с. отсутствует. Следовательно, для всех исследуемых вариантов схем совмещенной трехфазно-однофазной обмотки ее разнополюсные цепи электромагнитно независимы.

Расчет по приведенной методике параметров различных вариантов схем трехфазно-однофазной совмещенной обмотки при  $p_1/p_2=1/3$  и  $q=2 \div 8$  сведен в таблицу, где значениям  $N/N'=0/0$  соответствует обычная трехфазная двухслойная обмотка со средним шагом катушек по пазам  $y'_{\text{п.ср}}=2q$  и  $x=1$  («базовая» обмотка); значком (\*) в таблице отмечены варианты схем обмотки (для  $q=6$  и 8) при  $q/2$  катушках с  $x\omega_k$  и  $(2-x)\omega_k$  витками. Пример выполнения совмещенной обмотки при  $p_1/p_2=1/3$ ,  $q=6$  ( $z=36$ ),  $N/N'=1/2$  и  $x=1,125$  показан на рис. 6, а, где верхний ряд стрелок показывает направления трехфазного тока при питании обмоток через зажимы  $C1, C2, C3$  ( $p_1=1$ ), а нижний ряд стрелок — направления однофазного тока при питании обмотки через зажимы 01—02 ( $p_2=3$ ); из рис. 6, б чередование фазных зон для полюсности  $p_1=1$  видно соотношение чисел витков катушек подгрупп.

Представление в предлагаемой методике обмоточных коэффициентов совмещенной обмотки в виде произведения коэффициентов распределения  $k_p$  (в обычном для трехфазной двухслойной обмотки виде) и укорочения  $k_y$  позволяет определять расчетное укорочение шага катушек  $\beta$  по (11) и (16). Это обстоятельство дает возможность по известным методикам [8—10] проводить расчет параметров пазового и лобового рассеяния совмещенной обмотки с использованием коэффициентов [8]  $k_p=\Phi(\beta)$  и  $k'_p=\Psi(\beta)$ . Для расчета параметров дифференциального рассеяния совмещенной обмотки воспользуемся коэффициентом дифференциального рассеяния  $\sigma_d$  [3, 7], характеризующим качество обмотки по уровню содержания в кривой ее м.д.с. высших гармонических и определяемым по многоугольникам или интегральным кривым м.д.с.: для трехфазной цепи с полюсностью  $p_1$  [3]

$$\sigma_{dp}=[(R_d/R)^2-1]100\%, \quad (18)$$

$$\text{где } R_d^2=\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z R_i^2, \quad R=zk_{ob}/\pi p_1 \text{ — квадрат}$$

среднего радиуса пазовых точек ( $i=1 \div z$ ) многоугольника м.д.с. (строится по чередованию фазных зон  $A-X, B-Y, C-Z$  — см. рис. 6, б — с использованием вспомогательной треугольной сетки) и радиус окружности для основной гармо-

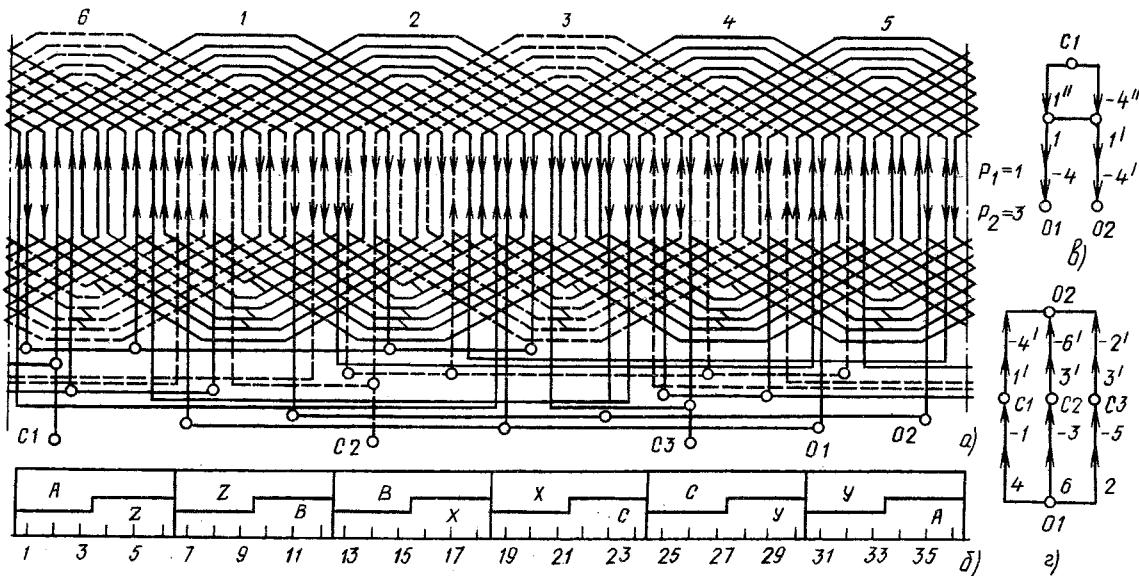


Рис. 6. Развёрнутая схема двухслойной трехфазно-однофазной совмещённой обмотки при  $p_1/p_2=1/3$ ,  $q=6$  и  $z=36$  (а); чередование фазных зон по пазам для полюсности  $p_1=1$  (б); диаграммы э. д. с. фазы для полюсности  $p_1=1$  (в) и обмотки для полюсности  $p_2=3$  (г)

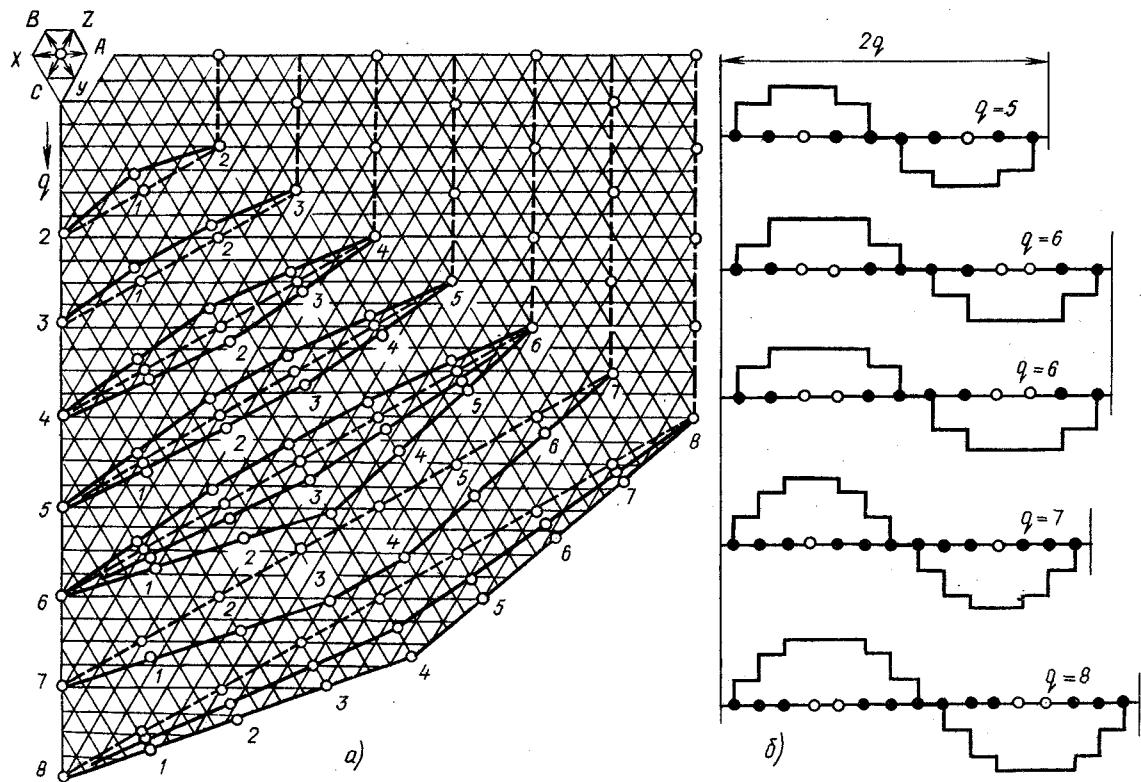


Рис. 7. К определению коэффициентов дифференциального рассеяния разнополюсных цепей совмещённой обмотки для трехфазной полюсности  $p_1=1$  (а) и однофазной полюсности  $p_2=3$  (б) при различных значениях  $q$

нической м.д.с. с обмоточным коэффициентом  $k_{\text{обр}}$ ,

для однофазной цепи с полюсностью  $p_2=3p_1$  [7]

$$\sigma_{dp2} [(\pi/k_{\text{обр}} F)^2 (\sum F_i^2/q)/8 - 1] 100 \%, \quad (19)$$

где  $F_i$  — скачок м.д.с. на  $i$ -м пазовом делении;  $F$  — амплитуда кривой м.д.с. для полюсности  $p_2$  (относительное значение).

На рис. 7, а построена часть многоугольников

м.д.с. для полюсности  $p_1=1$  совмещенных обмоток при  $q=2 \div 8$  (в центре изображены векторы токов фазных зон  $A, Z, B, X, C, Y$ ), откуда определяются значения  $R_d^2$  (по треугольной сетке, сторона которой принята за 0,5 единиц длины) и  $\sigma_{dp1}$  по (18). Пазовые точки на пунктирных линиях многоугольника (шестиугольника) рис. 7, а соответствуют обмотке при  $x=1$ ; для обмоток с  $x < 1$  пазовые точки многоугольника располагаются

ются выше пунктирных линий, а при  $x > 1$  — ниже. Например, для обмотки с  $q=6$  (см. таблицу) по рис. 7, а:

при  $x=1$  («базовая» обмотка при  $N/N'=0/0$ ; совмещенная обмотка при  $N/N'=2/3$ ) — для точек 1 и 5 —  $R_1^2=14^2+8^2+14\cdot 8=372$ ; для точек 2 и 4 —  $R_2^2=16^2+4^2+16\cdot 4=336$ ; для точки 3 —  $R_3^2=18^2=324$ ; точки 6 —  $R_6^2=3\cdot 12^2=432$ ;  $R_d^2=(2R_1^2+2R_2^2+R_3^2+R_6^2)/6\cdot 4=90,5$ ;  $R^2=(36\times 0,828/\pi)^2=90,025582$  и  $\sigma_{dp1}=0,527\%$ .

На рис. 7, б построены части интегральных кривых м.д.с. для полюсности  $p_2=3$  совмещенных обмоток при  $q=5 \div 8$ , откуда определяется  $\sigma_{dp2}$  по (19). Например, для обмотки с  $q=6$  (см. табл.):

при  $x=1 (N/N'=2/3) - \Sigma F_i^2/q = (1^2 \cdot 2 + 2^2 \cdot 2 + 2 \cdot 5^2)/6 = 16,25/6$ ;  $F=2,5$  и  $\sigma_{dp2}=[(\pi/0,721 \times 2,5)^2 (16,25/6 \cdot 8) - 1] 100 = 2,84\%$ .

Вычисления  $\sigma_{dp1}$  по (18) и  $\sigma_{dp2}$  по (19) для значений  $q=2 \div 8$  совмещенной обмотки сведены в таблицу.

По методике [8] удельная проводимость дифференциального рассеяния определяется выражением:

$$\lambda_d = \pi t \xi / (30 \delta k_d) = x \xi / (9,55 \delta k_d), \quad (20)$$

где  $t$ ,  $\delta$ ,  $k_d$  — зубцовое деление, воздушный зазор и коэффициент воздушного зазора, а коэффициент  $\xi$  вычисляется по [8] с использованием специальных расчетных кривых.

Согласно [9] коэффициент дифференциального рассеяния  $\sigma_d$  связан с коэффициентом  $\xi$  в (20) соотношением

$$\xi_d = 3(zk_{ob}/p\pi)^2 \sigma_d - k_{ob}^2 \Delta_3, \quad (21)$$

где  $zk_{ob}/p\pi=R$  — см. (18), а коэффициент

$$\Delta_3 = \varphi(b_w/\delta; b_w/t),$$

учитывающий зубчатость неявнополюсного сердечника, зависит от ширины открытия паза  $b_w$  и определяется по [8].

Сравним, например, для совмещенной равновитковой обмотки ( $x=1$ ) с  $q=6$  (см. таблицу) значения  $\xi_d$  по (21) для полюсности  $p_1$  и  $\xi$  по [8] при  $\Delta_3=0$ :

по [8]:  $\xi = C_\beta \theta^2 + 2k'_\beta - k_{ob}^2 = 0,0165 \cdot 36 + 2 \times 0,75 - 0,828^2 = 1,408$ , где  $C_\beta$  и  $k'_\beta$  по кривым [8—9] равны при  $\beta=2/3$ :  $C_\beta=0,0165$ ;  $k'_\beta=-0,75$ ; по (21) и таблице ( $\sigma_d=0,00527$ ):  $\xi_d=3(36 \cdot 0,828/\pi)^2 0,00527=1,423$ , т. е.  $\xi_d$  и  $\xi$  имеют достаточно близкие значения.

Таким образом, изложенная методика позволяет определять параметры пазового, лобового и дифференциального рассеяний совмещенной трехфазно-однофазной обмотки и вычислять индуктивное сопротивление рассеяния, используя известную методику [8].

Для оценки расхода меди на совмещенную трехфазно-однофазную обмотку рассматриваемого вида определим средний шаг катушек по пазам  $y_{n,sp}$  с учетом их неравных чисел витков. Для обмотки с числами витков катушек в группе в соотношении  $x:(2-x)$  шаг  $y_{n,sp}$  определяется с учетом (1) из выражения

$$y_{n,sp} = \frac{1}{q} \left[ x \sum_{k=1}^{N'} y_{n,k} + \sum_{k=N'+1}^{q-N'} y_{n,k} + (2-x) \sum_{k=q-N'+1}^q y_{n,k} \right] = \\ = 2[(xN' + q)(q - N') + (N')^2]/q; \quad (22)$$

для обмотки с четным значением  $q$  при числах витков катушек в группе в соотношении  $x:(2-x)$

$$y_{n,sp} = \frac{1}{q} \left[ x \sum_{k=1}^{q/2} y_{n,k} + (2-x) \sum_{k=q/2+1}^q y_{n,k} \right] = \\ = q(x+3)/2. \quad (23)$$

В частном случае при  $x=1$  из (22) и (23) следует, что  $y_{n,sp}=2q$ , что соответствует «базовой» трехфазной двухслойной обмотке (при  $N/N'=0/0$  в таблице).

Таким образом, отношением  $y_{n,sp}/2q$  можно оценивать расход меди на совмещенную трехфазно-однофазную обмотку с неравновитковыми катушками по сравнению с «базовой» трехфазной двухслойной обмоткой с шагом катушек  $y'_{n,sp}=2q$  и  $x=1$ , выполненной с полюсностью  $p_1$  в тех же пазах. В общем случае при  $x \neq 1$  средний шаг катушек  $y_{n,sp}$  по (22) или (23) не равен расчетному шагу катушек  $y_{n,p}$  из (11), определяемому по расчетному укорочению  $\beta$ .

Расчет  $y_{n,sp}$  по (22) и (23) для совмещенных обмоток с  $q=2 \div 8$  сведен в таблицу, анализ результатов которой показывает, что:

1) совмещенные трехфазно-однофазные обмотки с  $q=2$  и 3 выполнимы лишь при  $x < 1$ , а с  $q \geq 4$  — как при  $x < 1$ , так и при  $x \geq 1$ , причем соотношение между параметрами разнополюсных цепей обмотки зависит от чисел катушек первой  $N$  и второй  $N'$  подгрупп, имеющих соответственно по  $xw_k$  и  $(2-x)w_k$  витков;

2) дифференциальное рассеяние для трехфазной цепи с полюсностью  $p_1(\sigma_{dp1})$  возрастает при  $x < 1$  и снижается при  $x > 1$  по сравнению с «базовой» обмоткой при  $x=1$ , следовательно, обмотки с  $q \geq 4$  целесообразно выполнять при  $x > 1$ ;

3) для значений  $q \geq 6$  возможно выполнение наиболее технологичной равновитковой совмещенной обмотки при  $x=1 (N/N'=2/3$  для  $q=6 \div 8$ ;  $N/N'=3/4$  для  $q=8$ ), имеющей параметры «базовой» обмотки ( $N/N'=0/0$ ) для полюсности  $p_1$  и минимальное дифференциальное рассеяние для полюсности  $p_2$ , но несколько уступающей обмоткам при  $x > 1$  по параметрам  $k_{ob,p1}$ ,  $\sigma_{dp1}$ ,  $k_{ob,p2}$ ; по расходу меди совмещенная обмотка при  $x=1$  равна «базовой», так как для нее  $y'_{n,sp}/2q=1$ ;

4) наиболее высокие значения  $k_{ob,p2}$  достигаются в совмещенной обмотке с  $q \geq 4$  при числах катушек первой и второй подгрупп  $N/N'=1/2$ , так как при этом из цепи для полюсности  $p_2$  (зажимы 01—02) выводятся в дополнительные ветви катушки третьих подгрупп, имеющие относительно низкие значения коэффициентов укорочения для полюсности  $p_2$ ; с увеличением  $N$  и  $N'$  значение  $k_{ob,p2}$  снижается;

5) возможность выполнения совмещенной об-

q	$y_{\text{п.н}}/y_{\text{п.в}}$	$N/N'$	x	$p_1=1$						$p_2=3$					
				$k_{pp1}$	$k_{yp1}$	$k_{obp1}$	$\beta_1$	$y_{\text{п.ср}}$	$\sigma_{dp1}$	$k_{pp2}$	$k_{yp2}$	$k_{obp2}$	$\beta_3$	$\sigma_{dp2}$	
2	5/3	1/1 0/0	0,845 1,0	0,9659	0,8453 0,8660	0,8164 0,8365	0,641 2/3	3,845 4,0	3,316 2,848	0,7071	1,0	0,7071	1,0	23,37	
3	8/4	1/1 0/0	0,79 1,0	0,9598	0,8411 0,8660	0,8073 0,8312	0,636 2/3	5,72 6,0	1,749 1,408	0,8660	1,0	0,8660	1,0	9,66	
4	11/5	2/2 1/2 0/0	0,845 1,17 1,0	0,9577	0,8453 0,8888 0,8660	0,8095 0,8512 0,8294	0,641 0,697 2/3	7,69 8,34 8,0	1,131 0,706 0,880	0,6533 0,8047	1,0	0,6533 0,9508 0,7651	1,0 0,8 —	8,40 5,32	
5	14,6	2/2 1/2 0/0	0,81 1,145 1,0	0,9567	0,8416 0,8848 0,8660	0,8052 0,8465 0,8285	0,637 0,691 2/3	9,544 10,35 10,0	0,879 0,474 0,650	0,7694 0,8727	1,0	0,7694 0,8426 0,832	1,0 0,832 —	4,20 3,62	
6	17/7	2/2 1/2* 1/3* 2/3 0/0	0,79 1,125 1,355 1,0 1,0	0,9562	0,8411 0,8828 0,9136 0,8660 0,8660	0,8042 0,8441 0,8736 0,8280 0,8280	0,636 0,689 0,733 2/3 2/3	11,44 12,38 13,01 12,0 12,0	0,727 0,389 0,269 0,527 0,527	0,8365 0,9107 0,8365 0,7464 —	1,0	0,8365 0,9742 0,9283 0,9659 —	1,0 0,8872 0,7766 0,7210 —	2,85 3,65 3,36 2,84	
7	20/8	2/2 1/3 2/3 0/0	0,77 1,34 1,0 1,0	0,9558	0,8410 0,9106 0,8660 0,8660	0,8038 0,8704 0,8278 0,8278	0,636 0,729 2/3 2/3	13,34 15,17 14,0 14,0	0,657 0,219 0,428 0,428	0,8784 0,8784 0,8098 —	1,0 0,9438 0,9749 —	0,8784 0,8290 0,7895 —	1,0 0,786 0,857 —	2,79 2,83 1,79	
8	23/9	1/3* 2/4* 2/3 3/4 0/0	1,325 1,17 1,0 1,0 1,0	0,9556	0,9096 0,8888 0,8493 0,8660 0,8660	0,8692 0,8493 0,8276 0,8276 0,8276	0,727 0,697 2/3 2/3 2/3	17,30 16,68 16,0 16,0 16,0	0,177 0,257 0,381 0,381 0,381	0,9061 0,7893 0,8524 0,7819 —	0,9546 0,9508 0,9808 0,9808 —	0,8650 0,7505 0,8360 0,7044 —	0,807 0,80 0,875 0,875 —	2,81 1,44 1,50 2,12	

мотки рассматриваемого вида с различным соотношением между числами катушек подгрупп позволяет согласовывать параметры ее разнополюсных цепей и выбирать наиболее оптимальный вариант схемы обмотки, исходя из условий проектирования совмещенной электрической машины конкретного типа.

По [7] эффективность и качество совмещенной обмотки оцениваются произведениями для ее разнополюсных цепей обмоточных коэффициентов  $k_{obp1}k_{obp2}$  и коэффициентов дифференциального рассеяния  $\sigma_{dp1}\sigma_{dp2}$ ; по этим критериям наиболее эффективными являются схемы обмотки с наибольшим значением  $k_{obp1}k_{obp2}$  и наименьшим  $\sigma_{dp1}\sigma_{dp2}$ . Так как в исследуемой трехфазно-однофазной совмещенной обмотке для трехфазной полюсности  $p_1$  используются все катушки, а для полюсности  $p_2=3p_1$  — лишь их часть, соответствующая первой и второй подгруппам катушек группы, то для оценки ее эффективности следует также учитывать степень использования катушек одновременно для обеих полюсностей, которую определим исходя из следующих соображений. Если  $I_1$  и  $I_3$  — токи в проводниках совмещенной обмотки для цепей с полюсностями  $p_1$  и  $p_2$ , то  $N''=q-(N+N')$  катушек группы обтекаются током  $I_1$ , а  $(N+N')$  катушек — результирующим током  $\sqrt{I_1^2+I_3^2}$ , тогда среднее значение тока катушки равно

$$I_{\text{cp}}=[I_1(q-N-N')+(N+N')\sqrt{I_1^2+I_3^2}]/q,$$

откуда, считая упрощенно  $I_1=I_3$ , получаем

$$I_{\text{cp}}=I_1[q+(N+N')(\sqrt{2}-1)]/q. \quad (24)$$

При  $N+N'=q$  ( $N''=0$ ) из (24) следует, что  $I'_{\text{cp}}=I_1\sqrt{2}$ , тогда коэффициентом  $k_k=I_{\text{cp}}/I'_{\text{cp}}=[1+(N+N')(\sqrt{2}-1)/q]/\sqrt{2}$ , (25) значение которого при  $N+N'=q$  равно  $k_k=1$ , можно оценивать степень использования катушек совмещенной обмотки.

Для одновременного учета всех названных выше показателей эффективности, а также расхода меди, введем обобщенный коэффициент эффективности совмещенной обмотки в виде

$$k_{\text{ef}}=k_k(k_{obp1}k_{obp2}/\sigma_{dp1}\sigma_{dp2})2q/y_{\text{п.ср}}, \quad (26)$$

по которому с учетом (22) — (25) можно проводить сравнение различных схем трехфазно-однофазной совмещенной обмотки; чем выше  $k_{\text{ef}}$ , тем эффективнее обмотка.

Например, для вариантов схем совмещенной обмотки с  $q=6$  из таблицы указанные показатели эффективности равны:

$N/N'$	$k_{obp1}k_{obp2}$	$\sigma_{dp1}\sigma_{dp2}$	$y_{\text{п.ср}}/2q$	$k_k$	$k_{\text{ef}}$
2/2	0,6727	2,072	0,9533	0,9024	0,3073
1/2	0,7489	1,420	1,0317	0,8536	0,4364
1/3	0,6784	0,904	1,0842	0,9024	0,6246
2/3	0,5970	1,497	1,00	0,9512	0,3793

откуда видно, что  $(k_{obp1}k_{obp2})_{\max}=0,7489$  имеет обмотка при  $N/N'=1/2$  ( $x=1,125$ ),  $(\sigma_{dp1}\sigma_{dp2})_{\min}=0,904$  — обмотка при  $N/N'=1/3$  ( $x=1,355$ ),  $(y_{\text{п.ср}}/2q)_{\min}=0,9533$  — обмотка при  $N/N'=2/2$  ( $x=0,79$ ),  $(k_k)_{\max}=0,9512$  — обмотка при  $N/N'=2/3$  ( $x=1,0$ ), а  $(k_{\text{ef}})_{\max}=0,6246$  — обмотка при  $N/N'=1/3$ . Таким образом, для совмещенной обмотки с  $q=6$  наилучшей по обобщенно-

му коэффициенту эффективности  $k_{\text{эф}}$  (26) является обмотка при  $N/N' = 1/3$ , в то время как наиболее технологичная равновитковая обмотка (при  $N/N' = 2/3$ ) уступает ей по этому показателю в  $0,6246/0,3793 = 1,65$  раза.

Подобным образом оценивается эффективность совмещенной обмотки и для других значений  $q$ .

В результате проведенных исследований разработан ряд новых высокоеффективных и технологичных схем трехфазно-однофазной обмотки, которые могут весьма эффективно использоваться на статоре совмещенных электрических машин и устройств с двумя разнополюсными полями в магнитопроводе. При применении такой обмотки, например, в ферромагнитных статических устройствах (в расточку статора впрессован безобмоточный шихтованный кольцевой сердечник) с вращающимся магнитным полем (см. рис. 1, а), совмещенная обмотка трехфазными зажимами  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  подключается к трехфазной сети ( $U_1$ ,  $f_1$ ), а однофазные зажимы  $O_1$ — $O_2$  могут использоваться или для съема напряжения утроенной частоты [1] в схеме преобразователя частоты и числа фаз, или для подачи постоянного тока управления и подмагничивания магнитопровода в схеме ферромагнитного управляемого реактора [2] с синусоидальным рабочим током. В схеме синхронной машины с системой возбуждения (самовозбуждения) от третьей гармонической магнитного поля (см. рис. 1, б) напряжением утроенной частоты на зажимах  $O_1$ — $O_2$  совмещенной обмотки статора питается после выпрямления через вентильный блок и контактные кольца обмотка возбуждения явнополюсного ротора; согласование параметров разнополюсных цепей совмещенной обмотки в такой схеме осуществляется путем изменения чисел витков катушек дополнительных ветвей [7]. В схеме асинхронно-синхронного одномашинного преобразователя частоты (см. рис. 1, в) по отношению к зажимам  $O_1$ — $O_2$  совмещенная обмотка статора используется в качестве обмотки возбуждения обращенного синхронного генератора с полюсностью  $p_2 = 3p_1$  и с контактных колец ротора (с многофазно-трехфазной обмоткой совмещенного типа) снимается трехфазное напряжение  $U_2$  с частотой  $f_2 \approx 3f_1$ .

**Выводы.** 1. Приведенный алгоритм позволяет формировать различные схемы трехфазно-однофазной совмещенной обмотки с концентрическими катушками при соотношении чисел пар полюсов

трехфазной и однофазной цепей  $p_1/p_2 = 1/3$  для целых чисел пазов на полюс и фазу  $q = z/6p_1$ .

2. Разработанная методика исследования электромагнитных параметров трехфазно-однофазной обмотки позволяет достаточно просто и наглядно определить обмоточные коэффициенты ее разнополюсных цепей, а также вычислять расчетное укорочение шага катушек  $\varphi$  и коэффициент дифференциального рассеяния  $\sigma_{dp}$  по которым определяются параметры пазового, лобового и дифференциального рассеяний с использованием известных методик.

3. Оценка эффективности совмещенной трехфазно-однофазной обмотки по предложенному обобщенному коэффициенту эффективности  $k_{\text{эф}}$  учитывает произведения коэффициентов обмоточных  $k_{\text{обр}1}k_{\text{обр}2}$  и дифференциального рассеяния  $\sigma_{dp1}\sigma_{dp2}$  ее разнополюсных цепей, а также степень использования катушек одновременно для обеих полюсностей и расход меди, что позволяет проводить объективное сравнение различных вариантов схем совмещенной обмотки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загрядский В. И. Совмещенные электрические машины.— Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1971.— 164 с.
2. Попов В. И. Электромашинные совмещенные преобразователи частоты.— М.: Энергия, 1980.— 176 с.
3. Попов В. И. Матричный анализ схем обмоток совмещенных электрических машин.— Электричество, 1984, № 11, с. 36—43.
4. А. с. № 1476568 (СССР). Трехфазно-однофазная совмещенная электромашинная обмотка / В. И. Попов и др.— Бюлл. изобр. 1989, № 16.
5. А. с. № 1488925 (СССР). Трехфазно-однофазная электромашинная совмещенная обмотка / В. И. Попов.— Бюлл. изобр. 1989, № 23.
6. А. с. № 1494118 (СССР). Электромашинная совмещенная трехфазно-однофазная обмотка / В. И. Попов.— Бюлл. изобр. 1989, № 26.
7. Попов В. И. Оптимизация параметров совмещенной обмотки якоря для синхронных машин с системой возбуждения от третьей гармонической магнитного поля.— Электричество, 1989, № 7, с. 22—37.
8. Сорокер Т. Г. Многофазный асинхронный двигатель и преобразователь частоты: Поверочный расчет.— Труды ВНИИЭМ, 1959, т. 3.
9. Попов В. И. Определение дифференциального рассеяния многофазных совмещенных обмоток ротора одномашинных преобразователей частоты.— Электричество, 1987, № 6, с. 50—53.
10. Жерве Г. К. Обмотки электрических машин.— Л.: Энергоатомиздат, 1989.— 400 с.

# Сообщения

УДК 621.311.22.016.2.001.6

## Оптимизация режимов работы энергосистемы с учетом экологических факторов

ГОЛОВАНОВ А. П., ПАВЛОВА И. В.

Алма-Атинский энергетический институт

В настоящее время в энергетике, как и в других отраслях, значительное внимание уделяется проблеме снижения выбросов вредных веществ (ВВ) в окружающее пространство. Несмотря на это, тепловыми электростанциями (ТЭС) ежегодно выбрасывается около 20 млн. т окислов азота ( $\text{NO}_x$ ), серы ( $\text{SO}_2$ ), золы, причем в ближайшие 15 лет предполагается увеличение мощности ТЭС в 2 раза, что соответственно приведет и к увеличению выбросов ВВ [1]. Поэтому наряду с применяемыми сегодня традиционными средствами снижения выбросов, такими как различного типа фильтрующие системы, актуально применение и других альтернативных способов уменьшения выбросов ВВ, и особенно — не связанных со значительными капитальными вложениями. К ним можно отнести использование алгоритмов диспетчерского управления электроэнергетическими системами (ЭЭС) с учетом экологических и экономических факторов. По существу, решение задачи заключается в перераспределении генерирующей мощности ЭЭС или, что эффективнее, объединенной энергосистемы (ОЭС) с минимизацией функции затрат на топливо ЭЭС  $f_1 = \sum_{i=1}^N C_i(P_i)$  и функции ущерба вследствие выбро-

$= \sum_{i=1}^N C_i(P_i)$  и функции ущерба вследствие выбро-

сов ВВ  $f_2 = \sum_{i=1}^N Y_i(P_i)$  от ТЭС в ЭЭС, т. е.

$$\left[ \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + \sum_{i=1}^N Y_i(P_i) \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $P_i$  — мощность, генерируемая  $i$ -й ТЭС (генератором) ОЭС;  $N$  — число ТЭС в ЭЭС (ОЭС);  $Y_i$  — ущерб от выбросов ВВ  $i$ -й ТЭС (генератором).

В данной статье на примере Павлодарской ЭЭС рассматривается система почасового диспетчерского управления выбросами, которая разрабатывается для ОЭС Казахстана в Алма-Атинском энергетическом институте. На рис. 1 показана структурная схема управления выбросами ВВ. Модель данной системы учитывает экологический фактор, оценка которого осуществляется по специально разработанному для решения данной задачи алгоритму на основе [2], где некоторые параметры берутся неизменными (например, высота труб, роза ветров за определенный период времени, население и площадь городов и т. д.), а часть параметров можно изменять (например, скорость ветра). В зависимости от возможности сбора информации — при наличии возможности пе-

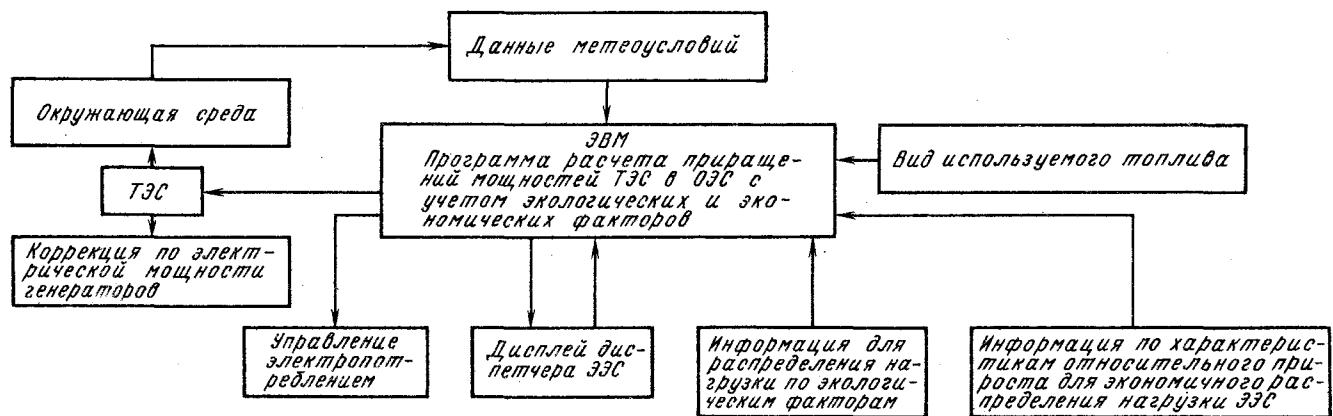


Рис. 1. Структурная схема управления выбросами ВВ на ТЭС с учетом экологических и экономических факторов

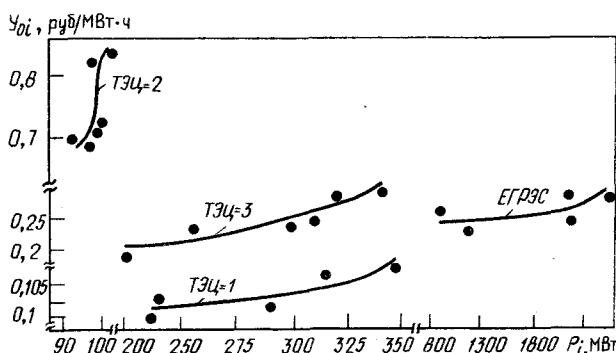


Рис. 2. Зависимости ущерба вследствие выбросов ВВ от активной нагрузки ТЭС Павлодарской ЭЭС

редачи телематики — предлагается оперативное управление с ежечасным заданием ТЭС корректирующих мощностей. Диапазон регулирования мощности задается каждой ТЭС заблаговременно (за сутки) и в случае необходимости корректируется. Зависимости ущерба от выбросов ВВ при изменении электрической мощности для каждой ТЭС подбираются на основе экспериментальных данных для различных режимов ТЭС с усреднением их методом наименьших квадратов. На рис. 2 представлены наиболее характерные зависимости  $Y_i = f(P_i)$  для ТЭС Павлодарской ЭЭС (с Экибастузским углем), которые были получены в рабочих режимах каждой электростанции в течение нескольких дней в зимний период для диапазона изменения мощностей  $(0,7 \div 0,95) P_n$ . В сущности, эти зависимости близки по своему характеру к характеристикам относительного прироста каждой ТЭС. Выходящие газы отбирались в специальные пробирки как на самих ТЭС, так и в радиусе от 5 до 200 км (для Экибастузской ГРЭС до 280 км) от ТЭС на вертолете МИ-8. Анализ выбросов ВВ осуществлялся с помощью массспектрометра. Предварительно распространение шлейфов выбросов ВВ фиксировалось с помощью космических спутников и использовалось как для определения указанных выше расстояний для исследований, так и для расчетов ущербов от выбросов ВВ. При проведении экспериментов персонал ТЭС, как обычно, занимался текущими вопросами эксплуатации, в том числе и внутристанционной оптимизацией режима работы ТЭС, что в конечном счете отразилось и в представленных на рис. 2 «выходных» характеристиках (без учета пусковых режимов отдельных генераторов).

Разрабатываемая система включает в себя следующие четыре варианта управления

**1. По минимальным затратам на топливо ТЭС ЭЭС и при ограничениях по концентрации выбросов.**

$$\min \sum_{i=1}^N C_i(P_i), \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

а также

$$P_n + \Delta P = \sum_{i=1}^N P_i; \quad (3)$$

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \quad (4)$$

$$P_{\text{сеч. min}} \leq P_{\text{сеч.}} \leq P_{\text{сеч. max}}; \quad (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} G(X_1, Y_1, P_1, \dots, P_N) \leq G_1; \\ G(X_2, Y_2, P_1, \dots, P_N) \leq G_2; \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$G(X_i, Y_i, P_1, \dots, P_N) \leq G_i,$$

где  $P_n$  — нагрузка электропотребления ЭЭС;  $\Delta P$  — потери мощности в электрической сети ЭЭС;  $P_{i \min}$  и  $P_{i \max}$  — ограничения по мощности  $i$ -го генератора ЭЭС;  $P_{\text{сеч. min}}$  и  $P_{\text{сеч. max}}$  — ограничения по мощности сечения контролируемых электропередач;  $G(X_i, Y_i, P_1, \dots, P_N)$  — функция концентрации окислов азота и серы, измеряемая стационарными установками на поверхности земли в положении  $X_i, Y_i$  при мощности ТЭС  $P_1, \dots, P_N$ .

**II. По минимальным ущербам от выбросов ВВ при ограничениях затрат на топливо ТЭС в ЭЭС.**

$$\min \sum_{i=1}^N Y_i(P_i), \quad i=1, 2, \dots, N,$$

с учетом тех же ограничений, что и в (3), (4), (5), а также

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i C_i(P_i) \leq C_{\max}, \quad (7)$$

где  $C_{\max}$  — предельно допустимые затраты на топливо ТЭС в ЭЭС;  $\alpha_i$  — коэффициент, значение которого (от 1 и менее) зависит от ограничений  $C_i$ .

**III. По минимальным ущербам от выбросов ВВ при ограничениях затрат на топливо ТЭС при управлении электропотреблением ЭЭС.** Введение управления электропотреблением (перенос нагрузки из максимальных режимов в минимальные), согласованное с управлением в соответствии с вариантом II, позволит наиболее экономично, из-за увеличения диапазона в (4), распределять нагрузку в течение суток с дополнительным снижением выбросов ВВ (по сравнению со II вариантом).

$$\min \sum_{i=1}^N Y_i(P_i), \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

с учетом ограничений (3), (4), (5) и (7).

**IV. По минимальным затратам на топливо ТЭС ЭЭС и при ограничениях по выбросам ВВ с учетом налогообложения ТЭС за превышение выбросов ВВ сверх допустимых значений.**

$$\min \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + S V_i(P_i), \quad i=1, 2, \dots, N,$$

где  $S$  — норма налогообложения за превышение значения выбросов (руб/кг) с учетом ограничений

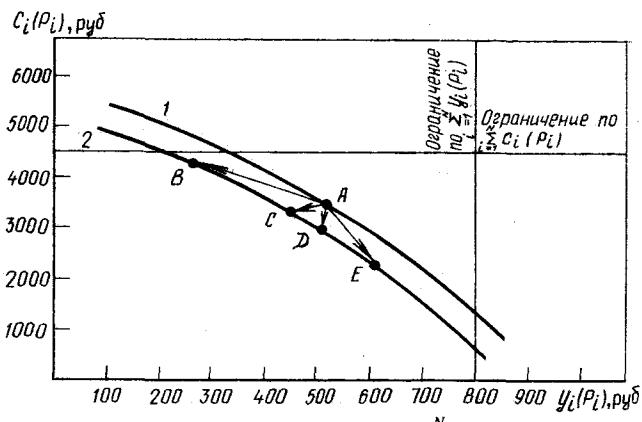


Рис. 3. Зависимости затрат на топливо  $\sum_{i=1}^N C_i(P_i)$  от ущерба

вследствие выброса ВВ  $\sum_{i=1}^N y_i(P_i)$  ТЭС в ЭЭС: 1 — до оптимизации режима; 2 — после оптимизации режима ЭЭС с уменьшением мощности ТЭС на 4% в соответствии с возможностями регулировочного диапазона

(3), (4), (5);  $V_i$  — выбросы ВВ на  $i$ -й ТЭС.

Поставленная задача содержит несколько целевых функций, которые необходимо минимизировать одновременно. Для решения этой задачи желательно иметь единый критерий оценки. Этого можно достигнуть, суммируя все кривые ущербов от выбросов  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , золы:

$$f_2 = \sum_{i=1}^N (Y_{is}(P_i) + Y_{in}(P_i) + Y_{iv}(P_i)), \quad (9)$$

где  $Y_s$ ,  $Y_n$ ,  $Y_v$  — значения удельных ущербов от выбросов соответственно окислов азота, серы и золы.

Функция затрат на топливо на ТЭС с достаточной точностью описывается уравнением

$$\sum_{i=1}^N C_i(P_i) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2), \quad (10)$$

а функцию ущерба от выбросов ВВ можно задать в виде

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N Y_i(P_i) = & \sum_{i=1}^N [(k_{is1} + k_{is2} P_i + k_{is3} P_i^2) + \\ & + (k_{in1} + k_{in2} P_i + k_{in3} P_i^2) + (k_{iv1} + k_{iv2} P_i + \\ & + k_{iv3} P_i^2)], \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $k_{is}$ ,  $k_{in}$ ,  $k_{iv}$  — соответствующие коэффициенты характеристик (10) и (11).

Для анализа альтернативных вариантов управления (I—IV) рассмотрим характеристические

зависимости  $\sum_{i=1}^N C_i = f\left(\sum_{i=1}^N (Y_i)\right)$  на примере Пав-

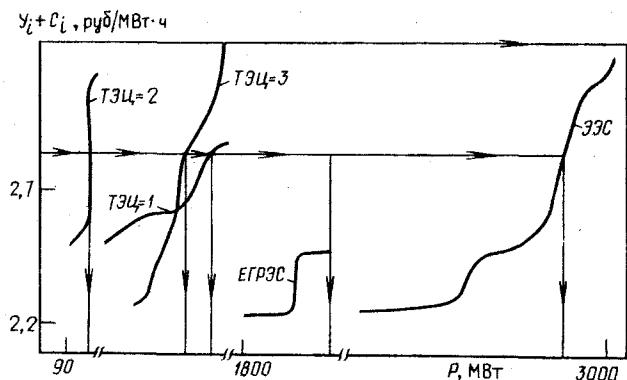


Рис. 4. Графическая интерпретация принципа распределения нагрузки ТЭС методом относительного прироста на примере Павлодарской ЭЭС

лодарской ЭЭС. Из рис. 3 видно, что при оптимизации режима возможен переход из точки А в диапазоны точек BC, CD, DE в зависимости от выбранной стратегии. Отрезок BC кривой зависимости 2 соответствует II и III вариантам управления, CD — варианту IV, DE — варианту I.

Характеристическую кривую можно рассчитать, решая параметрическую задачу  $P_\alpha$  [3] в виде:

$$\min [\alpha C_i(P_i) + (1-\alpha) Y_i], \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (12)$$

при ограничениях, аналогичных (4).

Параметр  $P_\alpha$  представляет собой ограниченную нелинейную функцию, которую требуется определить, последовательно перебирая значения  $\alpha$ , входящие в область  $\alpha \in (0; 1)$  для переменных при  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Вначале используется приближение «принудительной» функции, чтобы перевести задачу ограниченной оптимизации в задачу без ограничений в виде

$$\min F(P_i) = \{[\alpha C_i(P_i) + (1-\alpha) Y_i] + \xi P(P_i)\}, \quad (13)$$

где  $\xi$  — положительная константа;  $P$  — функция векторной переменной  $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iN})$ , которая соответствует всем условиям ограничений и имеет положительные значения, когда любое из условий ограничения нарушается.

После определения «принудительной» функции оптимизация сводится к минимизации непрерывной неограниченной функции из переменных, для чего используется градиентный метод.

Перераспределение нагрузки ТЭС в ЭЭС можно осуществить и по экологическим  $Y_{0i}(P_i)$ , экономическим  $C_{0i}(P_i)$  и эквивалентным  $C_{0i}(P_i) + Y_{0i}(P_i)$  характеристикам относительного прироста, где  $C_{0i}(P_i)$ ,  $Y_{0i}(P_i)$  — зависимости соответственно удельных затрат на топливо и удельного ущерба вследствие выбросов ВВ от активной нагрузки ТЭС. На рис. 4 на примере четырех ТЭС Павлодарской ЭЭС показано оптимальное распределение нагрузки в зависимости от выбранной стратегии управления. Сопоставление данного метода распределения нагрузки (как достаточно точного) при неизменной  $\sum_{i=1}^N P_i$  с методом опти-

мизации по (12), (13) позволяет говорить о несущественном отличии полученных результатов и, следовательно, о возможности применения (12) и (13) в зависимости от конкретной задачи и требуемой точности решения.

Таким образом, представленный выше алгоритм с использованием имеющейся базы передачи и обработки информации позволит по суммарным показателям каждой ТЭС произвести перераспределение мощностей на уровне диспетчера энергосистемы, улучшая экологию региона без существенных затрат.

**Выводы.** 1. Предложен алгоритм диспетчерского управления ЭЭС с учетом экологических факторов, предусматривающих несколько альтернативных вариантов ограничений, влияющих в конечном счете на стратегию перераспределения нагрузки.

2. При минимизации выбросов ВВ может иметь место как повышение, так и понижение

затрат на топливо ТЭС в зависимости от выбранной диспетчером ЭЭС стратегии управления.

3. Оптимальная функция управления ЭЭС в зависимости от выбранной диспетчером стратегии может определяться по суммарным экономическим и экологическим показателям ЭЭС, а также по характеристикам относительного прироста для ТЭС ЭЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические системы и сети (Обзорная информация). — М.: Инермэнерго, 1989, вып. 5.
2. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. — М.: 1986.
3. Geoffrion A. M. Solving bicriterion mathematical programs. — Oper. Res., 1977, vol. 15, pp. 39—54.

[10.04.90]

УДК 621.311.4.001.24

## Расчет параметров режима сетей электроснабжения на основе характеристик динамических процессов

КУРЕННЫЙ Э. Г., ДМИТРИЕВА Е. Н., ЧЕПКАСОВ Ю. И., ПУШНАЯ И. В.

**Постановка задачи.** Расчет электрических нагрузок и оценка электромагнитной совместимости (ЭМС) зачастую сводятся к определению характеристик того или иного линейного преобразования  $L$  суммарного процесса от группы  $n$  электроприемников. Например, для определения расчетной электрической нагрузки по нагреву согласно ПУЭ необходимо выполнить линейную операцию тридцатиминутного осреднения.

Обычная расчетная процедура такова (рис. 1, а): исходными данными являются характеристики индивидуальных процессов  $p(t)$  изменения нагрузки отдельных электроприемников, определяемые по технологическим данным или путем измерений измерителем И в действующих сетях. По этим данным определяются характеристики суммарного процесса  $P(t)$ , а лишь затем — исходного процесса  $P_L(t)$ . При таком подходе методы расчета оказываются громоздкими из-за процедур получения избыточной информации и последующего ее исключения.

В статье предлагается более эффективный метод расчета, в котором избыточная информация исключается на стадии получения исходных данных. Принята следующая терминология: процесс  $P_L(t)$  после линейного преобразования исходного процесса в общем случае именуется

динамическим процессом (ДП). В частных случаях термин конкретизируется: так, ДП, полученный путем осреднения на интервале длительностью  $\theta$ , называется кумулятивным, а процесс на выхо-

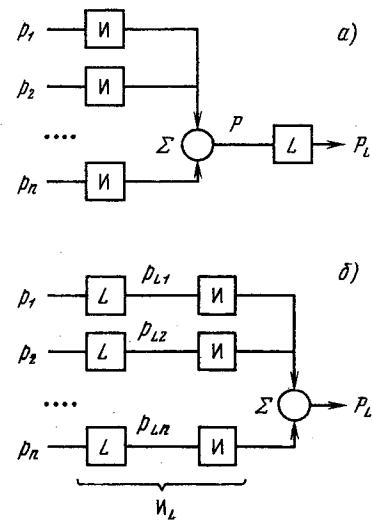


Рис. 1. Случай задания исходных для расчетов характеристик: а — входных процессов  $p(t)$ ; б — индивидуальных динамических процессов  $p_L(t)$

де апериодического звена первого порядка — инерционным [1]. Для определенности рассматриваются лишь две практические задачи: выбор проводников по нагреву и оценка допустимости быстрых изменений напряжения на зажимах ламп.

**Сущность метода.** Пусть сеть или электроприемник моделируется некоторым линейным фильтром  $L$ . Тогда воздействие входного процесса будет оцениваться по максимальному значению  $P_{L\max}$  группового ДП

$$P_L(t) = L\{P(t)\} = L\{\sum^n p(t)\} \quad (1)$$

на выходе фильтра. Не нарушая общности выводов, коэффициент передачи фильтра примем равным единице. В этом случае ординаты исходного и динамического процессов измеряются в одинаковых единицах, а их средние значения будут равны.

Представим выражение (1) в виде

$$P_L(t) = \sum^n L\{p(t)\} = \sum^n p_L(t), \quad (2)$$

т. е. как сумму индивидуальных ДП.

Математически оба выражения тождественны, однако их практическая реализация различна с точки зрения требуемой для расчетов информации. В первом случае исходными могут быть графики нагрузки, их плотности вероятностных распределений, корреляционные функции (КФ) или выражаемые через них спектральные плотности. Во втором случае искомый максимум определяется не по характеристикам индивидуальных графиков нагрузки, а по характеристикам индивидуальных ДП: средним значениям  $p_c$  и дисперсиям  $Dp_L$ . Поэтому здесь в систему  $I_L$  получения исходных данных входит как измеритель  $I$ , так и линейное преобразование (рис. 1, б). В этом и заключается метод ДП.

Преимущества метода ДП обусловлены следующим. Во-первых, определение некоторых характеристик становится излишним. Например, дисперсия ДП вычисляется непосредственно по реализации ДП. Тем самым отпадает необходимость в трудоемком процессе определения КФ  $k(t)$  или спектральной плотности  $S(\omega)$  при расчете дисперсии по известной формуле

$$DP_L = \int_0^\infty \int_0^\infty g(\xi)g(\eta)k(\xi - \eta)d\xi d\eta = \int_0^\infty A^2(\omega)S(\omega)d\omega, \quad (3)$$

где  $g(t)$  и  $A(\omega)$  — весовая и амплитудно-частотная (АЧХ) характеристики фильтра;  $\xi$  и  $\eta$  — вспомогательные переменные интегрирования;  $\omega$  — угловая частота.

Во-вторых, линейное преобразование может приближать вероятностное распределение ординат ДП к нормальному, что позволит принимать эту гипотезу даже при малом количестве суммируемых ДП (практически при  $n \geq 3$ ), а также без потери физического смысла до предела

упростить расчетную формулу метода ДП:

$$P_{L\max} = P_c + \beta \sqrt{\sum^n Dp_L}, \quad (4)$$

в которой среднее значение  $P_c$  равно сумме  $p_c$ , а статистический коэффициент  $\beta$  определяется по заданной допустимой вероятности превышения расчетного максимума (табл. 1 в [1]).

Существенно, что по указанным причинам экспериментальные исследования ДП упрощаются, несмотря на усложнение приборов. Например, регистрация сглаженных низкочастотным фильтром ДП осуществляется на малой скорости, в то время как для определения КФ или спектральной плотности требуется большая скорость, а в ряде случаев — и осциллографирование.

Для реализации метода в проектной практике необходимо выполнить исследования нагрузок характерных электроприемников с целью определения коэффициентов использования  $k_n$  и относительных значений  $Dp_L = Dp_L / p_{nom}^2$  дисперсий ДП, где  $p_{nom}$  — номинальная мощность. Тогда

$$P_{L\max} = \sum^n k_n p_{nom} + \beta \sqrt{\sum^n p_{nom}^2 Dp_L}. \quad (5)$$

Приборы для записи ДП выполняются в виде приставки-фильтра к обычным приборам или разрабатываются специально. По существу они являются моделями сети или электроприемников, поэтому метод ДП обеспечивает объективную оценку ЭМС, а также единство расчета, измерения и нормирования. При использовании приборов многоцелевого назначения информация выдается сразу о нескольких ДП.

Строго говоря, воздействия процессов на электроприемники зависят от квадратов ординат, что делает задачу нелинейной. Однако при большой инерционности объектов и независимости входных процессов это не препятствует применению метода ДП. В остальных случаях используются линеаризованные модели или приближенные методы перехода от максимумов (4) к приведенным максимумам  $P_{2L\max}$  квадратичного процесса [1]. Приемлемые результаты дает формула

$$P_{2L\max} \approx P_{L\max} + (P_{\max} - P_{L\max}) \frac{P_c - P_c}{P_{\max} - P_c},$$

в которой максимальное  $P_{\max}$  и эффективное  $P_c$  значения суммарного процесса вычисляются по средним значениям и дисперсиям индивидуальных процессов.

**Расчетная нагрузка по нагреву.** В соответствии с принятым в ПУЭ способом определения расчетной нагрузки  $P_p$  метод ДП сводится к статистическому методу [2] при условии, что расчет выполняется для  $\theta = 30$  мин по заданным кумулятивным дисперсиям  $Dp_\theta$  согласно (4):

$$P_p = P_c + \beta \sqrt{\sum^n Dp_\theta}. \quad (6)$$

При традиционном же подходе потребовалось бы вначале найти КФ или спектральные плотности индивидуальных графиков нагрузки и вычислить искомый максимум по одному из выражений [1, 3]:

$$P_{\theta \max} = P_c + \frac{\beta}{\theta} \sqrt{2 \sum_{i=1}^n \int_0^\theta \int_0^\theta k(\xi - \eta) d\xi d\eta} = \\ = P_c + 2\beta \sqrt{\sum_{i=1}^n \int_0^\infty \frac{\sin^2 \omega \theta / 2}{\omega^2 \theta^2} S(\omega) d\omega}.$$

Понятие получасового максимума не всегда адекватно отражает процесс нагрева: например, при периодическом изменении нагрузки с длительностью цикла, целое число раз укладывающейся в получасовом интервале, этот максимум оказывается равным средней нагрузке, что противоречит физическому смыслу. Кроме того, приборы непрерывного получасового осреднения получаются громоздкими.

С точки зрения физического смысла задачи достоверные оценки достигаются путем моделирования процесса нагрева проводника. Простейшей моделью является апериодическое звено первого порядка с постоянной инерции, равной постоянной нагрева  $T$  проводника. Исследования показали, что при  $T=800$  с это звено статистически эквивалентно кумулятивному звену с получасовым осреднением, и при этом выполняются требования ПУЭ.

В основном на таком представлении инерционным методом [4] в качестве исходных данных используются средние значения и инерционные дисперсии  $Dp_T$ . Расчетная нагрузка принимается равной инерционному максимуму

$$P_p = P_c + \beta \sqrt{\sum_{i=1}^n Dp_T}. \quad (7)$$

Прибор для получения исходных данных представляет пассивную  $RC$ -цепь при  $RC=T$ , подключаемую к обычным амперметрам. Простота прибора и автоматизация измерений позволяют существенно упростить экспериментальные исследования, выполняемые в течение весьма длительных промежутков времени.

**Доза колебаний.** Универсальным и объективным показателем допустимости быстрых изменений напряжения на зажимах ламп является доза колебаний напряжения  $\Psi$  [5]. Математическая модель (фликерметр) в этом случае включает линейный фильтр, моделирующий зрительное ощущение, квадратор и звено десятиминутного осреднения, моделирующее утомление человека [1].

Следует отметить, что до введения [5] в литературе использовалось тождественное по смыслу понятие дозы фликера. В связи с этим все результаты, полученные для дозы фликера в [1], полностью распространяются на дозы колебаний. Некоторые различия в АЧХ и допустимых дозах не имеют принципиального значения.

Доза колебаний численно близка к дисперсии процесса на выходе фильтра. Для группы электроприемников дозы суммируются, что позволяет применить здесь метод ДП, понимая под ДП процессы изменения индивидуальной  $\Psi_i(t)$  или групповой  $\Psi_i(t)$  доз колебаний нагрузки. Если колебания нагрузки стационарны, то индивидуальные дозы постоянны, а групповые дозы определяются их суммированием. В противном случае (например, для дуговых печей) расчет максимальной дозы колебаний суммарной нагрузки ведется по аналогичной (4) формуле:

$$\Psi_i(t) = \sum_{i=1}^n \psi_{ic} + \beta \sqrt{\sum_{i=1}^n D\psi_i}, \quad (8)$$

где  $\psi_{ic}$  и  $D\psi_i$  — средние значения и дисперсии процессов изменения индивидуальных доз. Эти характеристики могут быть получены путем измерения в действующих сетях фликерметром или рассчитаны по технологическим данным.

На примере дуговых печей наглядно видны преимущества метода ДП. В самом деле, при обычном подходе исходными для расчетов были бы КФ  $k(t_1, t_2)$  нестационарных нагрузок печей. Усложнение здесь связано с громоздкостью формулы

$$\psi_i(t) = \sum_{i=1}^n \int_0^t \int_0^t g(\xi)g(\eta)k(t-\xi, t-\eta) d\xi d\eta$$

для дозы колебаний и выражения для весовой функции. Кроме того, для определения КФ требуется осциллографирование нагрузки печи за периоды расплавления и трудоемкая статистическая обработка десятков таких осциллограмм. Запись же графиков доз колебаний осуществляется на малой скорости, а вычисление среднего значения и дисперсии не встречает затруднений.

Использование метода ДП для расчета доз колебаний возможно благодаря наличию десятиминутного осреднения после квадратора. Иначе обстоит дело с рассмотренным в [6] показателем допустимости колебаний напряжения — степенью резкости фликера. Хотя АЧХ фильтра соответствующей модели совпадает с АЧХ из [5], после квадратора предусмотрены звено с постоянной инерции 300 мс и нелинейная процедура статистической обработки, что не дает возможности получить аналитическое решение для группы электроприемников. Вместе с тем, во многих случаях оценки по дозе колебаний и степени резкости фликера практически совпадают, поэтому существенное усложнение расчетов по степени резкости фликера представляется неоправданным.

**Пример.** К имеющейся на заводе дуговой сталеплавильной печи 100 т планируется добавить две однотипные печи. Оценить возможность совместного питания печей и осветительной нагрузки, если точка их общего присоединения находится на шинах с номинальным напряжением  $U_{\text{ном}} = 220$  кВ и мощностью короткого замыкания  $S_k = 4600$  МВ·А.

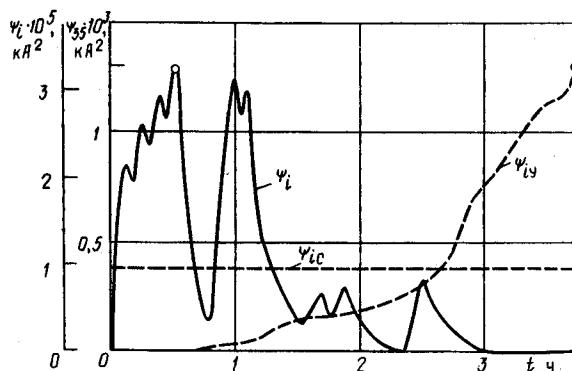


Рис. 2. График доз фликера  $\psi_i$  нагрузки и его упорядоченная диаграмма  $\psi_{iy}$  дуговой сталеплавильной печи 100 т

Из-за отсутствия приборов для записи доз колебаний оценку выполним согласно [1] по дозе фликера, допустимое значение которой составляет  $0,021 (\%)^2$ . По условиям эксплуатации запись доз фликера  $\psi_{35}(t)$  нагрузки действующей печи (рис. 2) была произведена фликерметром с токовой приставкой на напряжении 35 кВ. Для перехода к графику доз фликера нагрузки  $\psi_i(t)$  на напряжении 220 кВ достаточно изменить масштаб оси ординат в  $(35/220)^2$  раз. Среднее значение  $\psi_{ic} = 0,96 \cdot 10^{-5} \text{ кА}^2$  и дисперсия  $D\psi_i = 10^{-10} \text{ кА}^4$  были вычислены не по графику доз, а по его более плавной, упорядоченной диаграмме  $\psi_{iy}(t)$ .

Для перехода к дозам фликера напряжения необходимо характеристики доз фликера тока умножить на величину  $(U_{\text{ном}}^2/S_k)^2$ . Тогда с учетом (8) расчетная доза фликера напряжения при рабо-

те трех печей равна

$$\Psi_{\max} = 3U_{\text{ном}}^2 10^4 (n\psi_{ic} + \beta \sqrt{nD\psi_i}) / S_k^2 = \\ = 0,004 (\%)^2,$$

т. е. не превышает допустимого значения, поэтому колебания напряжения не сказываются на осветительной нагрузке.

**Вывод.** Для повышения достоверности и существенного упрощения расчетов электрических нагрузок и показателей ЭМС группы электро-приемников целесообразно в качестве исходных данных использовать характеристики динамических процессов, а не электрических нагрузок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шидловский А. К., Куренный Э. Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения.— Киев: Наукова думка, 1984.
2. Гиеденко Б. В. Теоретико-вероятностные основы статистического метода расчета электрических нагрузок промышленных предприятий.— Изв. вузов. Электромеханика, 1961, № 1.
3. Линейная фильтрация и прогнозирование процессов в системах электроснабжения / А. К. Шидловский, Э. Г. Куренный, Е. Н. Дмитриева и др.— Киев: Институт электродинамики АН УССР, 1988.
4. Инерционный метод расчета электрических нагрузок / А. К. Шидловский, Э. Г. Куренный, Е. Н. Дмитриева, А. А. Пожидаев.— Киев: Институт электродинамики АН УССР, 1983.
5. ГОСТ 13109-87. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения.
6. Mirra C., Sani G. Il fenomeno del Flicker. Analisi delle sue caratteristiche. Tecniche di misure e metodi di limitazione.— L'Elettrotecnica, 1987, N 8.

[04.04.91]

УДК 621.313.322.018.3

## К определению параметров синхронных генераторов малой мощности при частотах высших гармоник

ШИРОКОВ Н. Г., канд. техн. наук, КУТУЗОВ С. И., канд. техн. наук

Военно-воздушная инженерная академия им. Н. Е. Жуковского

Актуальность проблемы определения параметров синхронного генератора малой мощности по высшим гармоникам и методика расчета этих параметров достаточно подробно освещены в [1, 2]. Недостатками методики определения параметров синхронного генератора, приведенной в [1, 2], являются:

активное сопротивление синхронного генератора по высшим гармоникам принимается неизменным и равным сопротивлению обмотки фазы якоря на постоянном токе, что приводит к снижению точности определения параметров фильтров,

ограничивающих уровень высших гармоник на зажимах синхронного генератора;

использование методики определения параметров синхронного генератора по высшим гармоникам предполагает знание частотных характеристик нагрузки синхронного генератора, что в ряде случаев существенно затрудняет методику проведения эксперимента по определению указанных параметров синхронного генератора;

сложность расчетных соотношений, из которых определяются искомые параметры синхронного генератора: этот недостаток особенно проявляется

при работе синхронного генератора на смешанную нагрузку.

Перечисленные недостатки метода, изложенного в [1, 2], удается исключить при использовании методики, предлагаемой в настоящей статье.

Структурная схема эксперимента по определению параметров синхронного генератора по высшим гармоникам изображена на рис. 1. На данном рисунке синхронный генератор по исследуемой высшей гармонике  $n$ -го порядка представлен последовательной схемой замещения, включающей искомую э. д. с.  $E_n$ , а также искомые активное и индуктивное сопротивления  $r_{an}$  и  $x_{an}$  соответственно.

В исходном состоянии ключ  $K$  разомкнут. В ветвь нагрузки синхронного генератора с сопротивлением  $z_n(\cos \varphi_n)$  вводится цепь, состоящая из параллельного контура  $L_n C_n$  и конденсатора  $C_k$ . Указанный параллельный контур настраивается в режим резонанса токов на частоте исследуемой гармоники. Конденсатор  $C_k$  предназначен для компенсации индуктивной составляющей сопротивления контура  $L_n C_n$  на частоте основной гармоники. Таким образом, при высокой добротности катушки  $L_n$  участок цепи «контур  $L_n C_n$  — конденсатор  $C_k$ », настроенный в резонанс напряжений по основной гармонике, имеет сопротивление по этой гармонике, существенно меньшее сопротивления нагрузки  $z_n$ , т. е. этот участок цепи практически не изменяет характера и величины нагрузки. Кроме того, параллельный контур  $L_n C_n$  позволяет произвести разделение цепей по основной и исследуемой гармоникам:

по исследуемой гармонике рабочим является контур «синхронный генератор — измерительно-корректирующая цепь» (при замкнутом ключе  $K$ );

по основной гармонике рабочим контуром является контур «синхронный генератор — нагрузка  $z_n$ », что обеспечивается включением в измерительно-корректирующую цепь параллельного контура  $L_1 C_1$ , настроенного в резонанс токов по основной гармонике (при любом положении ключа  $K$ ).

Величина искомой э. д. с.  $n$ -й гармоники  $E_n$  синхронного генератора определяется прямым измерением с помощью анализатора спектра АС-1 при разомкнутом ключе  $K$ .

Для определения активного и индуктивного сопротивлений генератора по исследуемой гармонике замыкают ключ  $K$ , подключая тем самым к зажимам синхронного генератора измерительно-корректирующую цепь, включающую в себя упомянутый выше контур  $L_1 C_1$ , катушку  $L_k$ , конденсатор переменной емкости  $C$  и калибранный резистор  $r$ . Наличие параллельного контура  $L_1 C_1$  исключает воздействие измерительно-корректирующей цепи на режим работы синхронного генератора по основной гармонике, чем объясняется постоянство параметров  $E_n$ ,  $r_{an}$ ,  $x_{an}$  по исследуемой гармонике для каждого фиксированного режима работы генератора по основной гармонике.

Индуктивность катушки  $L_k$  выбирается из условия компенсации эквивалентного емкостного сопротивления контура  $L_1 C_1$  по исследуемой

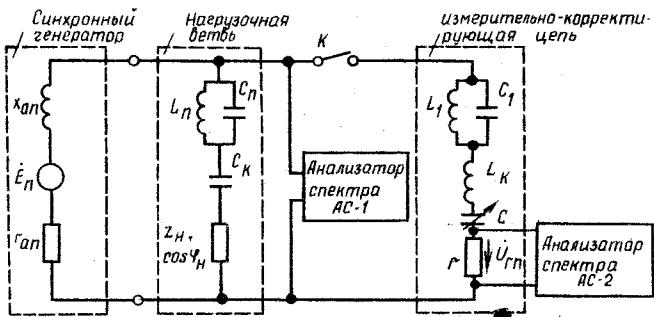


Рис. 1

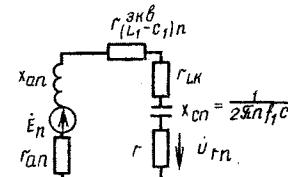


Рис. 2

гармонике. При этом условии для определения искомых параметров синхронного генератора  $E_n$ ,  $r_{an}$ ,  $x_{an}$  в контуре «синхронный генератор — измерительно-корректирующая цепь» с помощью конденсатора  $C$  обеспечивается режим резонанса напряжений по исследуемой гармонике. Эквивалентная схема замещения установки, используемая при определении параметров  $r_{an}$  и  $x_{an}$  генератора, представлена на рис. 2. Отсутствие в данной схеме нагрузочной ветви объясняется, как указывалось выше, настройкой контура  $L_n C_n$  в резонанс токов по исследуемой гармонике.

Для определения индуктивного сопротивления генератора  $x_{an}$  по исследуемой гармонике с помощью конденсатора переменной емкости  $C$  добиваются максимума напряжения  $U_{rn}$  данной гармоники на калиброванном резисторе  $r$ . Максимум напряжения  $U_{rn}$  фиксируется анализатором спектра АС-2. При условии точной компенсации эквивалентного емкостного сопротивления контура  $L_1 C_1$  по исследуемой гармонике индуктивным сопротивлением катушки  $L_k$ , искомая величина индуктивного сопротивления генератора  $x_{an}$  определяется из выражения

$$x_{an} = x_{cn} = \frac{1}{2\pi f_1 n C^{\max}}, \quad (1)$$

где  $f_1$  — частота основной гармоники;  $n$  — порядок исследуемой гармоники;  $C^{\max}$  — емкость конденсатора  $C$ , соответствующая максимуму напряжения  $U_{rn}$  исследуемой гармоники на резисторе  $r$ .

Значение искомого активного сопротивления  $r_{an}$  генератора определяется из условия резонанса напряжений в контуре «синхронный генератор — измерительно-корректирующая цепь». При этом общее реактивное сопротивление указанного контура равно нулю, а искомое активное сопротивление определяется из соотношения

$$r_{an} = r(E_n/U_{rn}^{\max} - 1) - r_{L_k} - r_{(L_1 - C_1)n}, \quad (2)$$

где  $r_{L_k}$  — активное сопротивление катушки  $L_k$ ;  $U_{rn}^{\max}$  — максимум напряжения исследуемой гармоники на резисторе  $r$  при  $C = C^{\max}$ ;  $r_{(L_1-C_1)_n}^{\text{экв}}$  — эквивалентное активное сопротивление контура  $L_1C_1$  на частоте исследуемой гармоники.

Значение  $r_{(L_1-C_1)_n}^{\text{экв}}$  в выражении (2) определяется из соотношения

$$r_{(L_1-C_1)_n}^{\text{экв}} = \frac{r_{L_1} x_{C_1}^2(n)}{r_{L_1}^2 + [x_{C_1(n)} - x_{L_1(n)}]^2}, \quad (3)$$

где  $r_{L_1}$  — активное сопротивление катушки  $L_1$ ;  $x_{C_1(n)} = \frac{1}{2\pi f_1 n C_1}$  — емкостное сопротивление конденсатора  $C_1$  по  $n$ -й гармонике;  $x_{L_1(n)} = 2\pi f_1 n L_1$  — индуктивное сопротивление катушки  $L_1$  по  $n$ -й гармонике.

Приведенная методика определения параметров синхронного генератора по высшим гармоникам была апробирована на синхронном генераторе авиационного электромашинного преобразователя ПАГ-1ФП для 5-й и 11-й гармоник. На рис. 3 и 4 приведены зависимости параметров указанного выше синхронного генератора в функции тока нагрузки по основной гармонике. Сравнение соответствующих параметров для различных гармоник показывает существенную зависимость активного и индуктивного сопротивлений генератора от порядка гармоник.

Проверка правильности определения параметров синхронного генератора на частотах высших гармоник по изложенной методике производилась сопоставлением экспериментальных и расчетных значений напряжения исследуемой гармоники  $U_{nn}$  на зажимах генератора. Расчетные значения  $U_{nn}$  были получены в соответствии со схемой на рис. 5 по найденным ранее значениям  $E_n$ ,  $r_{an}$  и  $x_{an}$  и известном сопротивлении нагрузки  $z_{nn}$ ,  $\cos \varphi_{nn}$  по исследуемой гармонике. На рис. 3 и 4 представлены расчетные и экспериментальные зависимости напряжений  $U_{n5}$  и  $U_{n11}$  для 5-й и 11-й гармоник соответственно в функции тока нагрузки по основной гармонике при работе указанного выше генератора на активную нагрузку. Относительное расхождение соответствующих расчетных и экспериментальных значений  $U_{nn}$  не превышает погрешности используемого в эксперименте гармонического анализатора.

Предложенная методика определения параметров синхронного генератора по высшим гармоникам позволяет:

определить эквивалентное активное сопротивление синхронного генератора по высшим гармоникам, что дает возможность уточнить добавочные потери в машине по методике [3];

повысить точность определения параметров

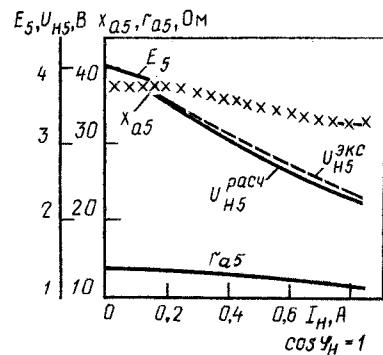


Рис. 3

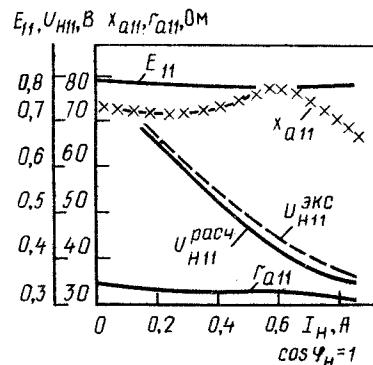


Рис. 4

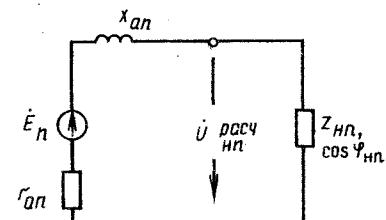


Рис. 5

фильтров, ограничивающих уровень высших гармоник напряжения на зажимах генератора;

повысить точность определения параметров  $x_{an}$  и  $E_n$  генератора по сравнению со способом, изложенным в [1, 2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1203443 (СССР). Способ определения э. д. с. и индуктивного сопротивления синхронного генератора / Н. Г. Широков, С. И. Кутузов.— Опубл. в Б. И., 1987, № 9.
2. Широков Н. Г., Кутузов С. И. Метод определения э. д. с. и индуктивных сопротивлений синхронных генераторов малой мощности на частотах высших гармоник.— Электричество, 1986, № 4.
3. Данилевич Я. Б., Каширский Э. Г.— Добавочные потери в электрических машинах.— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1963.

# Расчет оптимального расположения барьеров в высоковольтной полимерной изоляции кабелей

КАЗАНЧЯН Г. П., КАЗАНЧЯН А. П., ГАСПАРЯН М. С., ЛИКАХ С. Ф.

Ереван

Практически любая полимерная изоляция представляет собой гетерогенную систему благодаря наличию неоднородностей самого материала и из-за конструктивных неоднородностей (дефектов) [1]. В электрическом поле эти неоднородности приводят к появлению локальных концентраций напряженностей, что и является источником развития разрушительных процессов в изоляции.

Поэтому мероприятия по повышению надежности изоляции можно разделить на две части:

мероприятия, направленные на снижение степени гетерогенности изоляции (чистота применяемых материалов, совершенство технологии изолирования, исключение конструктивных дефектов и т. д.);

мероприятия, направленные на подавление влияния вышеуказанных неоднородностей, обуславливающих концентрации напряженностей электрического поля в изоляции.

Радикальным способом подавления эффекта концентраций электрических напряженностей в полимерной изоляции является применение барьеров повышенной диэлектрической проницаемости. Как было показано в [2], барьеры повышенной диэлектрической проницаемости способствуют выравниванию (сглаживанию) локальных напряженностей электрического поля в изоляции, и это, как правило, приводит к повышению пробивной прочности изоляции. С увеличением количества барьеров этот эффект усиливается [3]. Действие барьера с повышенной диэлектрической проницаемостью в полимерной изоляции на основании результатов экспериментов и аналитического изучения процессов можно объяснить следующими обстоятельствами.

Благодаря созданию искусственной анизотропии поля, обусловленной соотношением диэлектрических проницаемостей барьерного слоя и изоляции  $\epsilon_b/\epsilon_{iz} \gg 1$ , происходит сглаживание локальных напряженностей электрического поля (в переменном электрическом поле).

Диэлектрические барьеры делят толстостенную высоковольтную изоляцию на отдельные тонкие слои (соединены последовательно барьерными слоями), каждый из которых работает автономно при сохранении монолитности покрытия в целом.

Являясь квазиквипотенциальными поверхностями, барьеры, соответственно влияют на конфигурацию электрического поля, одновременно ограничивая объемы, где могут образовываться объемные заряды.

Барьеры являются надежной преградой на пути развития триинглов, ограничивая их междубарьерным расстоянием.

Исходя из вышеизложенного легко понять, что на электрическую прочность изоляции и ее надежность оказывает влияние как количество, так и местонахождение барьеров. Это заключение

подтверждается многочисленными экспериментальными данными. Практически, чем больше барьеров в изоляции, тем выше ее изоляционные свойства, но сегодня их количество ограничивается технологическими возможностями. Именно поэтому при ограниченном заданном количестве барьерных слоев вопрос их оптимального размещения в изоляционном покрытии становится актуальным.

При определении параметров оптимального размещения барьеров в изоляции за основу берется условие равновероятности пробоя каждого слоя при эксплуатации кабеля. Вероятность пробоя  $F$  слоя изоляции при воздействии электрического поля напряженностью  $E$  в течение времени  $t$  описывается, как известно, экстремальным распределением минимальных величин — распределением Вейбулла [4, 5]:

$$F = 1 - \exp \left[ -\left( \frac{t}{t_0} \right)^a \left( \frac{E}{E_0} \right)^b \right], \quad (1)$$

где  $t_0$  и  $E_0$  — соответственно время до пробоя и напряженность поля при  $F = 1 - e^{-1} = 0,632$ ; коэффициенты  $a$  и  $b$  — параметры распределения, определяемые экспериментально [6].

Если потребовать, чтобы для всех слоев изоляции кабеля, разделенных  $n$  барьерами, значение  $F$  было одинаково, то получим систему из  $n$  уравнений

$$\left( \frac{t}{t_{0i}} \right)^{a_i} \left( \frac{E}{E_{0i}} \right)^{b_i} = \left( \frac{t}{t_{0(i+1)}} \right)^{a_{i+1}} \left( \frac{E_i}{E_{0(i+1)}} \right)^{b_{i+1}}, \quad (2)$$

где  $t_{0i}$ ,  $E_{0i}$ ,  $a_i$ ,  $b_i$  — параметры распределения  $i$ -го слоя (номер слоя увеличивается по направлению радиуса);  $E$  и  $E_i$  — максимальные напряженности электрического поля соответственно в первом и в  $(i+1)$ -м слое.

Так как в коаксиальной изоляции кабеля напряженность электрического поля увеличивается с уменьшением радиуса изоляции, то выполнение условия (2) при одинаковых временах пробоя будет возможно, только если параметры слоя  $E_{0i}$ ,  $b_i$  будут увеличиваться с уменьшением номера слоя за счет уменьшения объема слоя и, в частности, его толщины.

Действительно, в [7] показано, что наблюдаемое снижение кратковременной электрической прочности ( $E_0$ ) с увеличением объема изоляции можно объяснить возрастанием числа статистически распределенных в веществе изоляции неоднородностей (статистический объемный эффект), а снижение длительной электрической прочности с увеличением толщины изоляции (снижается  $b$ ) объясняется существованием в ней объемных зарядов (физический объемный эффект).

Ниже приведены зависимости электрической прочности полиэтиленовой изоляции от ее толщины при переменном напряжении [5, 7]:

$\delta, \text{мм}$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$E_0, \text{kV/mm}$	130	105	88	80	78	73	70	68
$\delta, \text{мм}$	8,0	10	12	14	16	18	20	22
$E_0, \text{kV/mm}$	66	62	60	57	55	54	53	52

Эти данные характеризуют снижение кратковременной электрической прочности при увеличении толщины изоляции взятые из [5, 7]. Решая задачу наименьших квадратов с использованием ортогональных полиномов [8], можно найти функциональную зависимость  $E_0 = E_0(\delta)$  в табличной форме.

В [4] экспериментально найдено, что коэффициент  $a$  в формуле (1) при длительном старении не зависит от объема изоляции и, следовательно, для всех слоев одинаков. Предполагая постоянность значений  $t_{0i}$  для всех слоев, систему уравнений (2) можем переписать в виде

$$\left( \frac{E}{E_{0i}} \right)^{N_i} = \left( \frac{E_i}{E_{0(i+1)}} \right)^{N_{i+1}}, \quad (3)$$

где  $N_i = b_i/a$  является показателем срока службы  $i$ -го слоя.

При пробое импульсным напряжением кабеля с полиэтиленовой изоляцией коэффициент  $b$  уменьшается с 11,3 при толщине изоляции 3,4 мм до 8,5 при толщине изоляции 19 мм [5]. Тогда, принимая линейной зависимость  $N(\delta)$  с начальным значением, равным 15 [7], получим:

$$N(\delta) = 15 - 0,1\delta, \quad 0 < \delta \leq 19. \quad (4)$$

Обозначая радиусы барьерных слоев через  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и учитывая, что

$$Er = E_1x_1 = E_2x_2 = \dots = E_nx_n, \quad (5)$$

систему уравнений (3) можно переписать в виде

$$\left[ \frac{E}{E_0(x_1 - r)} \right]^{N(x_1 - r)} = \left[ \frac{rE}{x_1 E_0(x_{i+1} - x_i)} \right]^{N(x_{i+1} - x_i)}, \quad (6)$$

где  $r$  — радиус жилы кабеля;  $x_{i+1} = R$  — наружный радиус кабеля.

В (6) толщина слоя барьера не учитывалась ввиду того, что она на порядок меньше толщины слоя изоляции, и ею в первом приближении можно пренебречь.

Для численного решения системы нелинейных уравнений (6) был использован глобально-сходящийся модифицированный метод Ньютона [8]. Так как рассматриваемые задачи плохо масштабированы, то проводилось диагональное масштабирование исходной задачи на каждой итерации. На основе разработанных алгоритмов создан комплекс программ, позволяющий для любого заданного числа барьеров определить их оптимальное местонахождение в изоляции. Комплекс программ составлен на языке Turbo Pascal 6.0 для персонального компьютера IBM PS/2.

Систему нелинейных уравнений (6) можно использовать для нахождения расположения барьеров при переменном и импульсном напряжениях. Для кабелей постоянного тока ею можно воспользоваться, если вместо уравнения (4) использовать [9]:

$$N(\delta) = 15 - 0,4\delta, \quad 0 < \delta \leq 25 \quad (8)$$

и соответствующие значения  $E_0(\delta)$ , что впервые создает реальные основы разработки кабелей постоянного тока с монолитной изоляцией.

В качестве примера в таблице приведены рассчитанные по (6) положения двух барьеров в кабеле переменного тока на напряжение 220 кВ с толщиной изоляции 22 мм и сечением токопроводящей однопроволочной жилы 500  $\text{мм}^2$  ( $r = 14,25$ ).

Расположение барьеров в зависимости от их числа

$n$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	21,88	—	—
2	17,64	24,64	—
3	16,25	19,81	26,12

Если радиус токопроводящей жилы настолько больше толщины изоляции, что поле в ней приближается к однородному, то решение (6) приводит к равномерному распределению барьеров по толщине изоляции.

Выражение (2) можно использовать для определения увеличения наработки кабеля с барьерами по сравнению с кабелем без барьеров. В случае вышеприведенного примера для двух барьеров увеличение наработки, рассчитанное по средним рабочим напряженностям при вероятности отказа 0,1, составило два порядка. Возможно, такое большое значение увеличения во времени связано с тем, что принцип независимости работы отдельных слоев, положенный в основу расчета, может соблюдаться не полностью, кроме того, имеются другие, неучтенные, факторы старения. Однако найденный принцип конструирования толстостенной монолитной полимерной изоляции открывает новые возможности и может оказать существенное влияние на повышение надежности кабелей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пешков И. Б., Шувалов М. Ю. Кабели высокого напряжения с пластмассовой изоляцией, перспективы развития, методы оценки ресурса, механизмы образования триингов. — Электротехника, 1991, № 3.
- Казанчян Г. П., Казанчян А. П., Гаспарян М. С. Влияние барьеров на распределение электрического поля в изоляции. — Электричество, 1991, № 5.
- Казанчян Г. П., Ликах С. Ф. Барьеры с повышенной диэлектрической проницаемостью в полимерной монолитной электрической изоляции. — Электричество, 1990, № 6.
- Ушаков В. Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
- Кабели высокого напряжения. Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86)/Под ред. И. Б. Пешкова, С. Е. Глейзера. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

6. Metra P., Portinari G., Ochini E. Reliability in service of cable with extruded insulation.— IEEE Trans. on PAS, 1975, vol. PAS-94, № 3.

7. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения/ М. Байер, В. Бек, К. Мёллер, В. Цаенгль: Пер. с нем.— Под ред. В. П. Ларионова.— М.: Энергоатомиздат, 1989.

8. Дэннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений.— М.: Мир, 1988.

9. Уиди Б. Кабельные линии высокого напряжения: Пер. с англ.— М.: Энергоатомиздат, 1983.

[27.09.91]

УДК 621.372.6:621.317.33

## Частотный метод диагностирования электрических цепей

КАЗАКОВ О. И., инж.

В статье рассмотрен метод диагностирования линейных электрических цепей, основанный на билинейной зависимости между произвольной передаточной функцией цепи и ее  $RLC$ -параметрами. В отличие от билинейного метода, описанного в [1], настоящий метод, использующий введенную диагностическую функцию, позволяет получить значения  $RLC$ -параметров для допустимого набора неисправных элементов схемы, в частном случае обеспечивая однозначное указание неисправного элемента и значение его параметра. Поэтому данный метод предлагается называть модифицированным билинейным методом (МБМ).

В отличие от методов диагностирования, основанных на косвенном изменении параметров элементов, таких, например, как  $Y$ - и  $Z$ -методы идентификации [2], МБМ основан на априорном знании номинальных значений параметров схемы, что делает его родственным методу фиктивных токов [3]. Получение параметров неисправных элементов по данным результатов измерений, в отличие от ряда известных методов [4—6], не требует решения систем линейных или нелинейных уравнений.

Рассмотрим произвольную передаточную функцию  $F(j\omega)$   $RLC$ -схемы для заданной частоты  $\omega$  как функцию от сопротивления некоторого элемента схемы  $Z(j\omega) = \{R, j\omega L, 1/j\omega C\}$  [7]:

$$F = \frac{F(Y=0)Z + F(Z=0)Z_T}{Z + Z_T}, \quad (1)$$

где  $ZY=1$ ;  $Z_T$  — сопротивление Тевенина.

Предположим, что один из  $RLC$ -параметров элемента изменился. Тогда, зная экспериментальные значения передаточной функции  $F_e$ , можно определить сопротивление такого элемента по формуле

$$Z_e = \frac{F_e - F(Z=0)}{F(Y=0) - F_e} Z_T, \quad (2)$$

где  $F(Z=0)$ ,  $F(Y=0)$  и  $Z_T$  не зависят от сопротивления  $Z_e$  элемента с измененным параметром. Используя (1), исключим из (2)  $Z_T$ :

$$\underline{Z}_e = m \underline{Z}, \quad (3)$$

где

$$m = \frac{\underline{F}_e - F(Z=0)}{\underline{F} - F(Z=0)} \frac{F(Y=0) - \underline{F}}{F(Y=0) - \underline{F}_e}. \quad (4)$$

Будем называть функцию  $m$  диагностической функцией. Отметим, что если  $\underline{F}(Z=0) = \infty$ , то первая дробь в (4) равна единице; если  $\underline{F}(Y=0) = \infty$ , то вторая дробь в (4) равна единице.

На основании диагностических формул (3), (4) выделим следующие виды состояния диагностируемого элемента:

1) если  $\underline{F}_e = F(Z=0)$ , то вид неисправности — короткое замыкание;

2) если  $\underline{F}_e = F(Y=0)$ , то вид неисправности — обрыв;

3) если  $\underline{F}_e = \underline{F}$ , то неисправность не обнаружена;

4) если  $\text{Re}(m) = m$ ,  $\text{Im}(m) = 0$  для всех частот, то реальное значение параметра определяется на основании формулы (3): а) для резистора  $R_e = mR$ ; б) для катушки индуктивности  $L_e = mL$ ; в) для конденсатора  $C_e = C/m$ .

Состояния 1 и 2 определяют катастрофические отказы, соответствующие в диагностировании цифровых схем константным нулю и единице; состояние 3 соответствует номинальному режиму. Состояние 4 является определяющим для выявления параметрического отказа в аналоговой схеме.

Рассмотрим свойства диагностической функции с точки зрения задачи определения неисправных элементов исследуемой схемы.

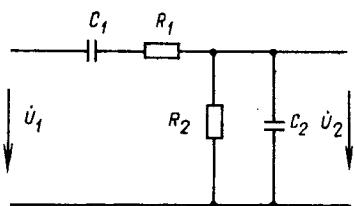


Рис. 1. Схема моста Вина,  $R_1=R_2=100$  Ом,  $C_1=C_2=10$  мкФ, резонансная частота  $\omega_0=1000$  рад/с, тестовые частоты  $\omega=\{250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750\}$  рад/с

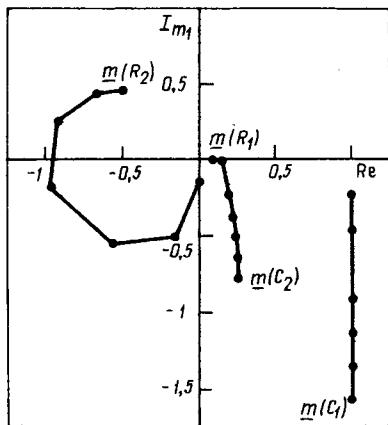


Рис. 2. Годографы диагностических функций

Пусть в схеме изменился параметр некоторого элемента. Будем рассчитывать диагностическую функцию  $m(Z_k)$  для каждого  $k$ -го подозреваемого элемента схемы в диапазоне заданных значений частот. Тогда необходимо различать два варианта поведения годографа диагностической функции для конкретного  $k$ -го элемента: во-первых,  $m(Z_k)$  не зависит от частоты и является точкой на вещественной оси комплексной плоскости; во-вторых,  $m(Z_k)$  зависит некоторым образом от частоты.

В первом случае  $k$ -й элемент попадает в разряд элементов с допустимой неисправностью, а его параметр определяется на основании формулы (3). Если таких элементов несколько, то они образуют множество допустимых неисправностей, которое аналогично множеству неоднозначности в методе справочников [1]. Для того чтобы определить вид годографа диагностической функции, необходимо использовать несколько тестовых частот, которые, например, можно брать равномерно распределенными в рабочей области частот.

**Пример 1.** На рис. 1 даны номинальные параметры и набор тестовых частот для моста Вина. Пусть измерения входного сопротивления для соответствующих частот равны следующим значениям:  $FZ_e=\{104-j423, 90-j240, 74-j181, 60-j150, 49-j129, 40,8-j113, 34,6-j100\}$ . Входное сопротивление фильтра определяется по формуле

$$FZ(j\omega) = \frac{1-\omega^2C_1R_1C_2R_2+j\omega(C_1R_1+C_2R_2+C_1R_2)}{j\omega C_1(1+j\omega C_2R_2)}$$

На рис. 2 представлены годографы диагностических функций, которые показывают, что не исправен элемент  $R_1$  и его параметр  $R_{1e}=0,1$ ,  $R_1=10$  Ом.

На характер диагностической функции влияют как тип передаточной функции и структура (топология) схемы, так и значения номинальных параметров схемы и соотношения между ними. Если схема обладает структурной или параметрической симметрией, то для заданной передаточной функции возможно несколько допустимых вариантов одиночных неисправностей. В этом случае существует набор допустимых неисправностей элементов  $Z_1, Z_2, \dots$ , для которых  $m(Z_k)=m_k$ , где  $m_k$  — вещественные константы. Для двух допустимых неисправностей элементов  $k$  и  $n$  выполняются равенства:

$$F(Z_k=0)=F(Z_n=0) \quad \text{и} \quad F(Y_k=0)=F(Y_n=0) \quad (5 \text{ а}, \text{ б})$$

$$F(Z_k=0)=F(Y_n=0) \quad \text{и} \quad F(Y_k=0)=F(Z_n=0), \quad (5 \text{ в}, \text{ г})$$

которые следуют из условия пропорциональности  $m(Z_k)$  и  $m(Z_n)$ .

Именно в смысле существования равенств (5) следует понимать симметрию схемы, которая ограничивает возможность однозначного поэлементного диагностирования по передаточной функции цепи. Отметим, что равенство (5а) всегда выполняется для параллельно соединенных элементов, а равенство (5б) — для последовательно соединенных элементов (структурная симметрия).

Использование в расчетах экспериментальных значений передаточной функции, включающей ошибки измерения, и номинальных значений параметров элементов вместо фактических приводит к разбросу расчетных величин и уменьшению точности диагностирования. Например, годограф диагностической функции неисправного элемента практически представляет не точку, а группу близко расположенных точек. В этом случае необходимо использовать методы статистического оценивания. Например, возможен расчет среднего значения и дисперсии для вещественной и мнимой частей диагностической функции на множестве тестовых частот.

**Пример 2.** Пусть для моста Вина (рис. 1) измерена передаточная функция по напряжению  $FU_z=\{0,104+j0,197, 0,256+j0,237, 0,35+j0,21, 0,402+j0,172, 0,432+j0,139, 0,449+j0,111, 0,46+j0,0868\}$ , которая определяется по формуле

$$FU(j\omega) = \frac{j\omega C_1 R_2}{1-\omega^2 C_1 R_1 C_2 R_2 + j\omega(C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_2)}$$

Средние значения и среднеквадратичные отклонения реальной и мнимой частей диагностической функции:

$$\begin{aligned}\overline{m(R_1)} &= \overline{m(C_2)} = 0,010 + j0,022 \cdot 10^{-3}; \\ \overline{m(R_2)} &= \overline{m(C_1)} = 0,59 + j0,43; \\ \underline{\sigma}(R_1) &= \underline{\sigma}(C_2) = (0,22 + j0,13) \cdot 10^{-3}; \\ \underline{\sigma}(R_2) &= \underline{\sigma}(C_1) = 0,25 + j0,10.\end{aligned}$$

В данном примере из-за параметрической симметрии допустимыми неисправными элементами могут быть  $R_1$  или  $C_2$  с параметрами 10 Ом или 100 мкФ соответственно. Для элементов  $R_2$  и  $C_1$  диагностическая функция зависит от частоты.

Использование МБМ основано на расчете передаточной функции для различных значений частот, а также для предельных и номинальных значений параметров схемы, которую достаточно задать в явном виде. Это позволяет реализовать алгоритм вычислений диагностической функции и ее анализ на ЭВМ (например, в составе автоматизированного испытательного оборудования). Отметим, что вместо  $R = \infty$ ,  $L = \infty$  и  $C = \infty$  для численных расчетов  $F(Z=0)$  или  $F(Y=0)$  можно использовать конечные значения параметров, в  $10^3 - 10^6$  раз превышающие их номинальные значения. Поскольку  $F(Z=0)$ ,  $F(Y=0)$  и  $F$  зависят от номинальных значений параметров элементов, то эти величины могут быть вычислены заранее для заданного набора тестовых частот и могут использоваться по мере необходимости проведения расчетов диагностической функции (4).

**Выводы.** 1. Разработан модифицированный билинейный метод диагностирования линейных электрических  $RLC$ -цепей, который позволяет определять неисправные элементы схемы и значе-

ния их параметров, не решая каких-либо систем уравнений.

2. В зависимости от вида диагностируемой функции и значений параметров схемы определяется либо множество допустимых неисправностей, либо единственный неисправный элемент на основании анализа годографов диагностических функций. Для уменьшения множества неопределенностей необходимо использовать другую передаточную функцию или несколько доступных для диагностирования передаточных функций.

3. Использование статистических методов оценивания, получаемых по формулам (3), (4), параметров (типа метода доверительных интервалов) позволяет иметь надежный математический базис для обоснования решения о достоверности той или иной рабочей гипотезы о состоянии элементов диагностируемой цепи. В этом случае не требуется построения годографов и для реализации метода рационально использовать ЭВМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бэндлер Дж. У., Салама А. Э. Диагностика неисправностей в аналоговых цепях.— ТИИЭР, 1985, т. 73, № 8.
2. Багриновский А. Д., Казаков О. И. Два метода измерения параметров элементов электрических цепей.— Сб. научно-методических статей по электротехнике.— М.: 1989, вып. 12.
3. Казаков О. И. Метод определения неисправных элементов в электрических схемах.— Электричество, 1987, № 5.
4. Киншт Н. В., Герасимова Г. Н., Кац М. А. Диагностика электрических цепей.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Демирчян К. С., Бутырин П. А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей.— М.: Высшая школа, 1988.
6. Данилов Л. В., Матханов П. Н., Филиппов Е. С. Теория нелинейных электрических цепей.— Л.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей.— М.: Советское радио, 1973.

[22.05.91]

УДК 621.316.5:536.5.001.6

## Распределение температуры по поверхности прямоугольных шин электрических аппаратов

ФОМИНЫХ Ю. А., СОКОВИШИН Ю. А., ОСОТОВ В. Н., МАСЛЕННИКОВ Д. С., КОНСТАНТИНОВ А. Г., ПАРЫЛИС М. Э., ГРЕДИТОР А. М.

В ряде конструкций шинопроводов и токоведущих систем высоковольтных электрических аппаратов, например в разъединителях на напряжение 6—10 кВ, выключателях нагрузки, шкафах КРУ и камерах распределительных устройств одностороннего обслуживания, а также в некоторых электрических схемах электростанций и подстанций и т. п. широко применяются установленные на «ребро» прямоугольные шины. В случае применения в перспективе биметаллических шин

вместо традиционных медных и алюминиевых в токоведущих системах аппаратов несомненный интерес представит распределение температур по контуру биметаллической шины [1]. Аналитическое исследование связано с рядом трудностей. Например, из [2] известно, что при горизонтально расположенных токоведущих шинах в воздушной среде при свободной конвекции их температурный режим может быть описан выражением:

$$I^2 k_d R_0 (1 + \alpha \vartheta) = S \Delta \vartheta \left[ 1,33 \cdot 10^{-4} \left( \frac{\Delta \vartheta}{S} \right)^{0,25} + 2,04 \cdot 10^{-11} T_0^3 (2,08 \cdot \frac{T}{T_0} - 1) \right], \quad (1)$$

где  $I$  — ток нагрузки;  $k_d$  — коэффициент добавочных потерь;  $R_0$  — сопротивление токоведущей системы при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления;  $S$  — периметр шины;  $\varepsilon$  — степень черноты поверхности шины;  $\vartheta = \vartheta_0 + \Delta \vartheta$  — абсолютная температура нагрева;  $\vartheta_0$  — температура окружающей среды;  $\Delta \vartheta$  — превышение температуры над температурой окружающей среды;  $T_0 = \vartheta_0 + 273$ ;  $T = \vartheta + 273$ .

Выражение в квадратных скобках правой части уравнения определяет коэффициент теплоотдачи шин, вычисление которого сопряжено с рядом трудностей [2], поскольку справочные теплотехнические данные зависят от ряда факторов (составление поверхности, протяженность и др.), и в ряде случаев соответствует только вполне определенным условиям [3]. Если же попытаться аналитически решить более сложную задачу, например определить распределение температуры по периметру шин или по высоте шины, установленной на «ребро», то использование большого числа справочных коэффициентов приведет к недопустимой разнице расчетных и экспериментально полученных значений. Поэтому ограничивались экспериментальным изучением этого вопроса при токах нагрузки 400, 630 и 1000 А, т. е. при токах, соответствующих номинальным токам наиболее массовых высоковольтных аппаратов и шинопроводов, установленных во многих распредустройствах на напряжения 6—10 кВ. Токоведущие шины, применяемые в электроустановках и электрических аппаратах, выбираются, как правило, по допустимому нагреву. Известно, что плотность тока по сечению шин распределяется неравномерно. В связи со сравнительно малыми размерами периметра и сечения шин за счет теплопроводности нагревы по сечению считались одинаковыми. Из этого исходили при выборе шин.

Исследования проводились на физических моделях, состоящих из двух параллельных шин сечением  $8 \times 80$ ,  $10 \times 100$ ,  $6 \times 60$ ,  $4 \times 40$  и др. длиной 3000 мм, установленных на «ребро» и расположенных в горизонтальной плоскости. Поверхность исследуемых шин соответствовала состоянию при поставке. С одной стороны концы шин подсоединялись к источнику тока, а с другой — соединялись электрически перемычкой. Источником тока являлся нагрузочный трансформатор.

Известно, что взаимное тепловое влияние параллельно расположенных шин практически отсутствует в тех случаях, когда отношение расстояния между параллельными шинами  $\delta$  к высоте шины  $H$  превышает 0,2. В исследуемых моделях это отношение составляло 0,75 и соответствовало значениям для разъединителей серии РВ на напряжения 6—10 кВ.

Поскольку погрешность измерения температу-

ры в поверхностном слое шин с помощью температур зависит от ряда факторов, связанных с процессом установки термопары [4, 5], и проведение измерений с помощью термопар требует относительно больших затрат времени, в исследованиях был применен промышленный тепловизор с разрешающей способностью  $0,1^\circ\text{C}$  при температуре  $30^\circ\text{C}$ . Тепловизором и термопарами измерялась температура нагрева в точках, расположенных на одних и тех же изотермах и удаленных между собой не более чем на 5—6 мм. Температуры измерялись в установившемся режиме теплообмена в средней части шин по длине. В процессе исследований принимались меры для исключения влияния случайных потоков воздуха на отвод тепла с поверхности шин, удаленных от поверхности пола на 1,4 м. Это обеспечивало свободный конвективный теплообмен вокруг шин.

Температура окружающего воздуха фиксировалась четырьмя спиртовыми термометрами с ценой деления  $0,1^\circ\text{C}$ , установленными в одной плоскости с шинами на расстоянии 1,8 м от них. Для исключения влияния электромагнитного поля на точность проводимых измерений тепловизор устанавливается на расстоянии около 3 м от шин.

При моделировании тепловых процессов токоведущие системы, например разъединителей, выключателей нагрузки, шинных токопроводов, могут быть сведены к комбинации простых однородных элементов. Взаимная обусловленность процессов переноса тепла в окружающей среде и внутри охлаждаемого тела определяет необходимость сопряженной постановки задачи расчета теплопроводности и радиационно-конвективного теплообмена [6].

Рассмотрим тепловой режим биметаллической шины с внутренними потоками тепла плотностью  $q_{v1}$  и  $q_{v2}$  и площадью поперечного сечения  $F_1$  и  $F_2$  каждого из составляющих слоев. Теплообмен с боковой поверхности осуществляется свободной конвекцией и излучением по закону Стефана—Больцмана. Теплопроводность по высоте пластины можно записать в виде

$$(\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2) \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} = \lambda_x p \vartheta + \sigma \epsilon p \left[ \left( \frac{\vartheta + T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - k_d \left[ I_1^2 \frac{\rho_{01}}{F_1} (1 + b_1 t) + I_2^2 \frac{\rho_{02}}{F_2} (1 + b_2 t) \right], \quad (2)$$

где  $\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности составляющих пластины;  $\vartheta$  — абсолютная температура нагрева;  $\alpha_x$  — локальное значение коэффициентов теплоотдачи;  $p$  — периметр шины;  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана, равна  $5,67 \text{ Вт}/\text{м}^2 \times \text{град.}$ ;  $\rho_{0i}$  — удельное омическое сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ;  $I_1$  и  $I_2$  — токи в слоях биметалла;  $b_1$  и  $b_2$  — коэффициенты аккомодации слоев пластины.

Пренебрегая теплопередачей с торцов пластины, граничные условия можно записать в виде

$$\frac{d\vartheta}{dx} = 0 \text{ при } x=0 \text{ и } x=l. \quad (3)$$

Отметим, что при введении средних по сечению значений параметров  $\lambda_{cp} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^2 \lambda_i F_i$ ,  $q_{x cp} \geq \frac{1}{F} \sum_{i=1}^2 q_{vi} F_i$  при постоянных значениях свойств переноса и  $F_i$  задача (2) для биметаллической пластины сводится к задаче теплопроводности в однородной пластине [6].

Сложность решения сопряженных задач свободной конвекции приводит к необходимости использовать простые методы расчета коэффициентов теплоотдачи. Явные зависимости получены приближенным интегральным методом [3]:

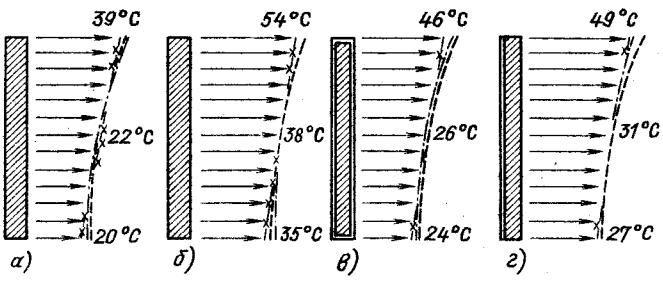
$$\alpha_x = \frac{\lambda_0}{x} \cdot 0,314 \frac{\theta^{0.95} x^{0.25} \left( \int_0^x \theta^{0.6} dx \right)^{0.5} R_{ax}^{0.25}}{\left[ \int_0^x \theta^{2.2} \left( \int_0^x \theta^{0.6} dx \right)^{0.5} dx \right]^{0.5}}, \quad (4)$$

где  $R_{ax}$  — число Релея, равное  $g \rho x^3 \theta \Pr/v^2$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\lambda_0$  — коэффициент кинематической вязкости;  $\beta$  — коэффициент термического расширения,  $\beta = 1/T$ .

Решение уравнений (2) и (3) проводилось численно методом конечных разностей. Найденные из (2) распределения температур использовались для расчета коэффициента теплоотдачи. Полученные из (4) значения  $\alpha_x$  вновь подставлялись в (2). Сходимость итерационного процесса считалась достигнутой, когда значения  $\theta$  во всех узлах расчетной сетки отличались от соответствующих значений в предыдущем приближении не более чем на 0,01 %. Это условие обычно выполняется на 6—7 итерациях.

Результаты расчетов задачи (2)—(4) показывают, что температура монотонно возрастает с высотой пластины. Само распределение температур зависит от параметра сопряжения и соотношения между материалами токоведущей системы [3, 6].

Исследовались модели, изготовленные из биметаллических медно-алюминиевых шин, а также шин, изготовленных из меди М1, алюминия АД0 и алюминия АД0, плакированного с одной стороны медью М1. Эпюры распределения превышений температуры над температурой окружающего воздуха по высоте исследованных образцов, построенные по результатам проведенных измерений, имеют один и тот же характер. Эпюры для шин сечением 8×80 мм при токе нагрузки 1000 А приведены на рисунке. Из приведенных эпюр видно, что превышения температуры, определенные по результатам измерений, проведенных с помощью тепловизора и термопар, отличаются в пределах точности проведенных измерений. Аналогичные результаты были также получены при токах нагрузки 400 и 630 А, чем экспериментально был подтвержден факт отсутствия взаимного влияния параллельных шин исследованных образцов на их тепловое состояние при изменении тока нагрузки в диапазоне от



Распределение избыточной температуры по высоте шин из меди (a), алюминия (b), биметалла (c), алюминия, плакированного медью (d): — · — · — измерения термопарой; — — — измерения тепловизором; — X — X — расчет

400 до 1000 А. В этой связи необходимо отметить, что для проведения цикла исследования тепловых режимов образцов с применением термопар затрачивалось более 4 ч, а при применении тепловизора с высокой разрешающей способностью на выполнение этого же объема исследований затрачивалось не более 20 мин. Таким образом, применение промышленных тепловизоров с высокой разрешающей способностью (например, 0,1 °C) позволяет значительно ускорить проведение исследований тепловых режимов прямоугольных шин и не требует принятия специальных мер по расширению площадей для их установки.

Анализ распределения превышения температуры по высоте шин показывает, что характер изменения их нагрева мало зависит от материала, из которого изготовлены шины, так как практически не меняется параметр сопряжения [6]. Однако наблюдается значительная неравномерность распределения превышения температур по высоте токоведущих шин. Отношение наибольшего превышения температуры, измеренного в верхней части шины, к наименьшему значению превышения температуры, измеренного в нижней части шины, для шин, изготовленных из меди и биметалла, составляет 1,8—1,9, а из алюминия — 1,6. Перепад температур по высоте токоведущей шины, очевидно, объясняется тем, что у шин с лучшей теплопроводностью имеется и больший перепад температуры по высоте, чем у шин с более низкой теплопроводностью, за счет увеличения теплоотдачи свободной конвекции. Поэтому исследование и контроль тепловых режимов прямоугольных шин, установленных на «ребро», целесообразно осуществлять путем измерения температуры верхней части шин, что создает определенные удобства для применения тепловизоров в целях контроля состояния шинопроводов, разъединителей, выключателей нагрузки и др., находящихся в эксплуатации.

**Выводы.** 1. Сопряженная задача теплопроводности и радиационно-конвективного теплообмена описывает температурный режим в токопроводах и токоведущих шинах высоковольтных электрических аппаратов с одномерным распределением температур по высоте. Достоверность предлагаемой математической модели подтверж-

дается экспериментальными исследованиями на шинах высотой 40—100 мм. Для прямоугольных медных и биметаллических шин неравномерность нагрева не превышает 1,9, для алюминиевых — 1,6.

2. Применение промышленных тепловизоров с высокой разрешающей способностью является эффективным средством ускорения работ как при проведении исследований и оценке теплового состояния открытых поверхностей прямоугольных шин в процессе разработки шинопроводов и токоведущих систем электрических аппаратов, так и при их профилактическом контроле в процессе эксплуатации.

3. С точки зрения равномерности нагрева токоведущих шин, устанавливаемых в электроустановках на «ребро», целесообразно применять их конусными в сечении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фоминых Ю. А., Волков В. А. Экономия цветных металлов в производстве разъединителей внутренней установки.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, 1983, № 1 (135), 2 (136).
2. Залесский А. М., Куеков Г. А. Тепловые расчеты электрических аппаратов.— Л.: Энергия, 1967.
3. Мартыненко О. Г., Соковишин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмен. Справочник.— Минск: Наука и техника, 1983.
4. Преображенский В. П. Технотехнические измерения и приборы.— М.— Л.: ГЭИ, 1983.
5. Барнетт. Погрешности термопарных измерений нестационарной температуры в обогреваемых пластинах, расположенных на изолированной поверхности.— Телепередача, 1983, № 4.
6. Соковишин Ю. А., Семин С. Л. Свободно-конвективный теплообмен на вертикальной пластине с внутренними источниками тепла.— Изв. АН БССР. Серия физико-энергетических наук, 1985, № 3.

[20.01.90]

УДК 007.5.001.24

## Алгоритмы идентификации дискретных динамических систем

НГҮҮЕН ТХҮК ЛОАН, НГҮҮЕНЬ МИНЬ ТУАН

Национальный центр научных исследований, Вьетнам

Рассмотрим линейную динамическую систему вида

$$A(q, \theta, na)y(k) = \sum_{j=1}^m B_j(q, \theta, nb)u_j(k) + C(q, \theta, nc)e(k), \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где предполагается, что известны порядки полиномов  $A, B_j, C$ ;  $y(k)$  и  $u_j(k)$  — выход и входы процесса в дискретные моменты времени  $k = 1, 2, \dots, N$  (здесь  $N$  — число дискретных интервалов);  $e(k)$  — дискретная форма последовательности типа белого шума с  $E\{e(k)\}=0$  ( $E\{\cdot\}$  — математическое ожидание).

Предположим, что  $A(q, \theta, na), B_j(q, \theta, nb), C(q, \theta, nc)$  — полиномы по оператору обратного сдвига [1]:

$$\begin{aligned} A(q, \theta, na) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_naq^{-na}, \\ B_j(q, \theta, nb) &= b_{j0} + b_{j1}q^{-1} + \dots + b_{jn}q^{-nb+1}, \\ b_{j0} &\neq 0 \quad (j = 1, \dots, m); \quad C(q, \theta, nc) = \\ &= 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_ncq^{-nc}; \quad \theta = (a^\top, b^\top, c^\top)^\top; \\ a^\top &= (a_1 \dots a_n); \quad b^\top = (b_1 \dots b_m); \quad b_j^\top = (b_{j0} \dots b_{jn}) \times \\ &\times (j = 1, \dots, m); \quad c^\top = (c_1 \dots c_n), \end{aligned} \quad (2)$$

где знак  $\top$  означает транспонирование.

Введем независимые переменные в уравнении регрессии при  $C(q, \theta, nc)=1, N \geq na + nb$ :

$$\begin{aligned} y &= [y(1) \dots y(N)]^\top; \quad e = [e(1) \dots e(N)]^\top; \\ h_i &= [-y(i-1) \dots -y(i-na) u_1(i) \dots u_1(i-nb+1) \dots \\ &\dots u_m(i) \dots u_m(i-nb+1)]^\top; \quad H = [h_1 \dots h_N]^\top. \end{aligned}$$

При помощи (2) уравнение (1) можно переписать в матричной форме:

$$y = H\theta + e. \quad (3)$$

Оценка по методу регуляризации Тихонова А. Н. для  $\theta$  получается с помощью минимизации нелинейного квадратичного функционала [2]:

$$J_\alpha(\theta) = \|y - H\theta\|^2 + \alpha\|\theta - \theta_0\|^2 \Rightarrow \hat{\theta}, \quad \alpha > 0, \quad (4)$$

где  $\theta_0$  — нулевое решение.

Из условия оптимальности

$$\nabla_\theta J_\alpha(\theta) = \frac{\partial J_\alpha(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (5)$$

следует

$$\hat{\theta}_\alpha = [H^\top H + \alpha I]^{-1} [\alpha \theta_0 + H^\top y], \quad (6)$$

где  $I$  — единичная матрица.

С помощью алгоритма (6) может быть оценено количество параметров  $n_a = na + m \times nb$ .

Для перехода к рекуррентной процедуре оценивания уравнения (1) перепишем в виде

$$y(k) = h^\top(k)\theta(k) + e(k), \quad (7)$$

где  $h^T(k) = [-y(k-1) \dots y(k-na) u_1(k) u_1(k-1) \dots \hat{u}_1(k-nb+1) U_m(k) \dots u_m(k-nb+1) e(k-1) \dots e \times \dots \times (k-nc)]$ ;  $\theta(k) = [a_1 \dots a_{na} b_{10} \dots b_{1nb-1} b_{m0} \dots b_{mn-1} \dots \times c_1 \dots c_{nc}]$ .

Поскольку входящие в алгоритм составляющие, обусловленные шумом, могут быть непосредственно измерены, будем идентифицировать с помощью невязки

$$\hat{e}(k-i) = y(k-i) - h^T(k-i)\hat{\theta}(k-i), \quad i = 1, 2, \dots, nc.$$

Оценка параметра осуществляется при помощи минимизации нелинейного квадратичного функционала невязки по  $\theta(k)$ :

$$J_\alpha(\hat{\theta}(k)) = \|y(k) - h^T(k)\hat{\theta}(k)\|^2 + \alpha\|\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1)\|_{P^{-1}(k-1)}^2 \Rightarrow \hat{\theta}. \quad (8)$$

Здесь  $P(k)$  является квазистационарной матрицей ошибки для  $\hat{\theta}[k]$  (1),  $\|\hat{\theta}\|_{P^{-1}}^2 = \hat{\theta}^T P^{-1} \hat{\theta}$ .

Условие оптимальности оценки следующее:

$$\nabla_{\theta} J_\alpha(\hat{\theta}) = \frac{\partial J_\alpha(\hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} = 0. \quad (9)$$

Оптимальная оценка  $\hat{\theta}(k)$  определяется следующим адаптивным алгоритмом:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \mu \hat{\theta}(k-1) + \Gamma(k) \operatorname{sign} \nabla_{\theta} J_\alpha(\hat{\theta}(k-1)), \\ \mu &\in 0,1, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Gamma(k) = I\gamma(k)$ ;  $I$  — единичная матрица ( $n_\alpha \times n_\alpha$ ), причем  $n_\alpha = na + m \times nb + nc$ ; а  $\gamma(k)$  — последовательность положительных чисел, такая что [3]

$$\gamma(k) \xrightarrow{k} 0; \sum_{k=1}^{\infty} \gamma(k) = \infty; \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^p(k) < \infty, \quad p \geq 2;$$

$\operatorname{sign}(\cdot)$  — нелинейность типа ограничения, определяемая как

$$\operatorname{sign}(x) = \begin{cases} +1 & \text{при } x > 0; \\ 0 & \text{при } x = 0; \\ -1 & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

Наряду с алгоритмом (10) рассматривается следующее рекуррентное соотношение:

$$\hat{\theta}(k) = \mu \hat{\theta}(k-1) + \Gamma(k) \operatorname{sign} \tilde{\nabla}_{\theta} J_\alpha(\hat{\theta}(k-1)), \quad (11)$$

где  $\Gamma(k) = I\gamma(k)$ ; вектор  $\tilde{\nabla}_{\theta} J_\alpha(\hat{\theta}(k-1))$  имеет компоненты

$$\begin{aligned} \tilde{\nabla}_{\theta} J_\alpha(\hat{\theta}(k-1)) &= (2c(k))^{-1} [J_\alpha(\hat{\theta}(k-1)) + \\ &+ c(k-1)e_i] - J_\alpha(\hat{\theta}(k-1)) - c(k-1)e_i + \eta(k, i); \\ \{e_i\} &— ортонормированный базис в  $R^l$ ; \\ \eta(k, i) &= (\eta(k, 1), \dots, \eta(k, l))^T — вектор, характеризующий погрешность вычисления разностей критерия  $J_\alpha(\hat{\theta})$ ; совокупность  $\{\eta(k)\}$  состоит из независимых случайных векторов; \end{aligned}$$

$$E\{\eta(k)\} = 0; E\{\eta^T(k)\eta(k)\} = \sigma_\eta^2 < \infty,$$

$c(k)$  — заданная положительная последовательность. В [4] полагают

$$c(k) = c(k+k_0)^{-v}, \quad c > 0;$$

$$n_0 \geq 0, \quad 0 < r < \mu t / (1 + \mu);$$

если  $\gamma(k) = \gamma(k+k_0)^{-t}, \quad \gamma > 0$ .

Авторы благодарят проф. Зубова В. И. и проф. Цыпкина Я. З. за постоянное внимание, помочь в работе и ценные советы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fkirin M. Choice of least-squares algorithms for the identification of ARMAX dynamic systems. — Int. J. Systems Sci., 1989, vol. 20, N 7, pp. 1221–1226.
2. Тихонов А. Н., Арсеньев В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979. — 286 с.
3. Цыпкин Я. З. Оптимальные алгоритмы оценивания параметров в задачах идентификации. — Автоматика и телемеханика, 1982, № 12, с. 9–23.
4. Альбер Я. И. Некоторые итеративные методы минимизации внерегулярных задач с оценками скорости сходимости. — Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1988, № 3, с. 22–39.
5. Зубов В. И. Математические методы исследования систем автоматического регулирования. — Л.: Машиностроение, 1974.
6. Зубов В. И. Лекции по теории управления. — М.: Наука, 1975.

[22.03.91]

# Заметки и письма

УДК 621.318.4:538.312

## К расчету энергии двух магнитно связанных контуров

СЕНИЛОВ Г. Н., доктор техн. наук

Московский энергетический институт

Известно, что Максвелл получил из второй формы уравнений Лагранжа [1] выражение для общей энергии магнитно связанных контуров тока (рис. 1) в виде

$$W_2 = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + M i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 = W_1 + W_{12} + W_2. \quad (1)$$

Имеются также выводы этого выражения, исходящие из предположения, что контуры питаются от двух различных источников или что токи  $i_1$  и  $i_2$  изменяются бесконечно медленно [2, 3]. Однако в действительности этого не бывает, ибо такие аппараты как катушки зажигания свечей, трансформаторы зажигания импульсных ламп, трансформаторы в преобразователях с обратным диодом, накопители в блоках питания ЭВМ и т. п.—питаются только от одного источника и работают при включении или выключении токов. Эти аппараты являются промежуточными звенями в цепи передачи и преобразования энергии.

В то же время расчет подобных аппаратов и определение энергии  $W_{12} + W_2$ , связанной с  $i_2$ , по уравнению

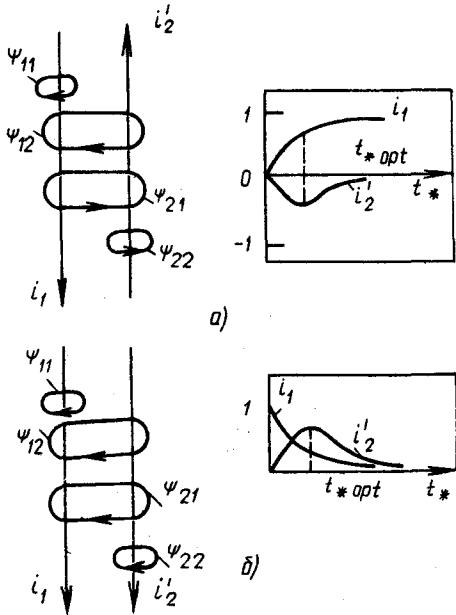


Рис. 1. Токи и магнитные потоки двух связанных контуров: а — включение  $i_1$ ; б — выключение  $i_1$ .

нико (1) приводят к отрицательным значениям энергии. Кроме того, запись уравнения (1) не позволяет найти оптимум для коэффициента магнитной связи обмоток  $K$ . Однако практикой установлено, что для катушек зажигания оптимальное значение  $K=0,65$ . Следовательно, уравнение (1) надо преобразовать так, чтобы его можно было использовать для расчета электрических аппаратов. Рассмотрим включение первичной обмотки катушки на постоянное напряжение  $E_1$  (аналогично можно рассмотреть выключение тока  $i_1=i_1$ ). Рассечения потокосцеплений для  $i_1$  и  $i_2$  будут

$$\psi_{11} = (1-k) L_1 i_1; \quad \psi_{22} = (1-k) L_2 i_2.$$

Каждый контур тока согласно рис. 1 связан с тремя магнитными потоками, которые наводят соответствующие э. д. с.  $E=d\psi/dt$ . Тогда для режима включения  $E_1$  на коротко замкнутую вторичную цепь имеем баланс напряжений

$$(1-k) L_1 \frac{di_1}{dt} + k L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + M \frac{di_2}{dt} = E_1; \quad (2)$$
$$(1-k) L_2 \frac{di_2}{dt} + k L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0.$$

Прежде чем определить из (2) значение энергии связанных контуров, введем значения коэффициентов магнитной связи обмоток  $K$ , взаимной индуктивности  $M$ , а также вторичного тока, приведенного к первичной обмотке  $i'_2$ . Проводимости для общего магнитного потока будут идентичны по отношению к обмоткам  $w_1$  и  $w_2$  как  $G_1 = G_2 = G$ . Тогда их индуктивности будут

$$L_1 = w_1^2 G; \quad L_2 = w_2^2 G; \quad \frac{w_2}{w_1} = \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}}; \quad M = k \sqrt{L_1 L_2}. \quad (3)$$

Далее имеем:

$$i'_2 = i_2 \frac{w_2}{w_1}; \quad i_2 = i'_2 \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}}; \quad (4)$$
$$i_2^2 L_2 = (i'_2)^2 L_1; \quad M i_2 = k L_1 i'_2.$$

Представляем (3) и (4) в (2), затем умножаем первую строку на  $i_1$ , вторую на  $i_2$ , интегрируем и складываем. Тогда общая электромагнитная энергия системы, полученная от источника  $E_1$ , будет

записана в виде

$$W_{\Sigma} = \int_0^t E_1 i_1 dt - \int_0^t i_1^2 R_1 dt - \int_0^t i_2^2 R_2 dt = \\ = \frac{1-k}{2} L_1 i_1^2 + \frac{k}{2} L_1 (i_1 \mp i_2')^2 + \frac{1-k}{2} L_2 i_2^2. \quad (5)$$

В режиме включения  $E_1$  согласно рис. 1 ток  $i_2$  отрицателен, при выключении  $i_1=1$  и ток  $i_2$  положителен.

Если выразить уравнение (5) через приведенный к первичной обмотке ток  $i_2'$ , то получим

$$W_{\Sigma} = \frac{1-k}{2} L_1 i_1^2 + \frac{k}{2} L_1 (i_1 \mp i_2')^2 + \frac{1-k}{2} L_1 (i_2')^2 = \\ = W_1 + W_{12} + W_2. \quad (6)$$

Для построения графиков энергии по (6) целесообразно применять следующие формулы в нормированных единицах, полученные из решения (2):

$$i_{1*} = 1 - \frac{1}{2} \left( e^{-\frac{t_*}{1+k}} + e^{-\frac{t_*}{1-k}} \right); \quad (7)$$

$$i_{2*} = -\frac{1}{2} \left( e^{-\frac{t_*}{1+k}} - e^{-\frac{t_*}{1-k}} \right), \quad (8)$$

где  $I_1 = \frac{E_1}{R_1}$ ;  $i_{1*} = \frac{i_1}{I_1}$ ;  $i_{2*} = \frac{i_2}{I_1}$  — приведенный нормированный вторичный ток;  $t_* = \frac{t}{T}$ ;  $T = \frac{L_1}{R_1}$ ;  $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ ; при  $L_1 = L_2 = 1$  имеем  $k = M$ ; при  $i_2 = \text{max}$  имеем  $t_{opt*} = \frac{1-k^2}{2k} \ln \frac{1+k}{1-k}$ .

В результате имеем следующее новое уравнение общей энергии магнитно связанных контуров в нормированных единицах:

$$W_{\Sigma*} = \frac{1-k}{2} i_{1*}^2 + \frac{k}{2} (i_{1*} \mp i_{2*})^2 + \frac{1-k}{2} (i_{2*}^2). \quad (9)$$

Нетрудно убедиться, что выражение для общей энергии в (9) тождественно с традиционной формулой Максвелла, которая в нормированных единицах будет выглядеть так:

$$W_{\Sigma*} = \frac{1}{2} i_{1*}^2 \mp k i_{1*} i_{2*} + \frac{1}{2} i_{2*}^2.$$

В то же время формула (9) больше соответствует физическому представлению, что электромагнитная энергия всегда пропорциональна квадрату силы тока. В данном случае, если, например, проводить аналогию с силовыми трансформаторами, то ток  $i_1 - i_2'$  эквивалентен току холостого хода  $i_0$ , который создает электромагнитное поле. Поэтому выражение  $\frac{k}{2} (i_{1*} - i_{2*})^2$  для  $W_{12}$  более оправдано, чем  $k i_{1*} i_{2*}$ .

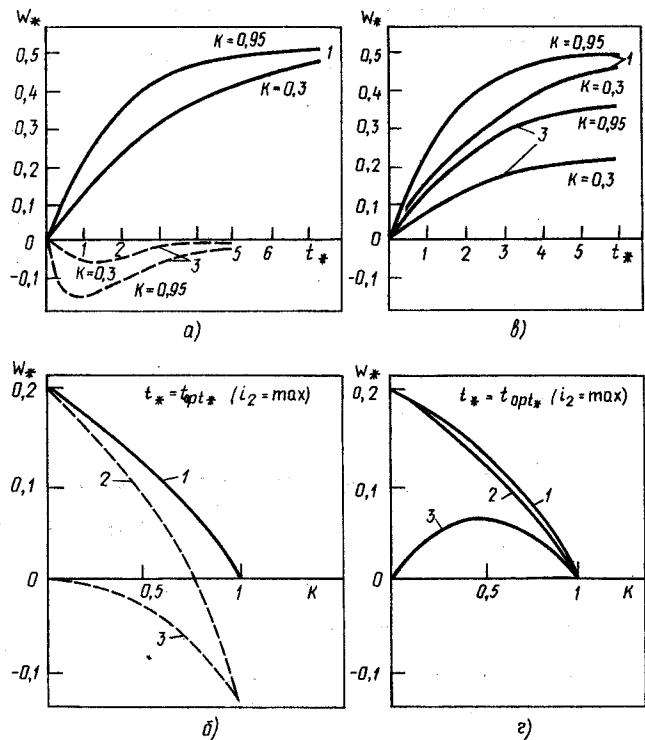


Рис. 2. Энергии двух магнитно связанных контуров: а, б — согласно формуле (10); в, г — согласно формуле (9); 1 —  $W'_{\Sigma*} = W_{1*} + W_{12*} + W_{2*}$ ; 2 —  $W_{1*} + W_{12*}$ ; 3 —  $W_{2*} + W_{12*}$

Отметим, что исходная система уравнения для э. д. с. (2) отличается от традиционных уравнений только разделением первых слагаемых  $L_1 \frac{di_1}{dt}$  и  $L_2 \frac{di_2}{dt}$  на два;

запись другого слагаемого неизменна —  $M \frac{di_1}{dt}$  и  $M \frac{di_2}{dt}$ .

Всего рассматриваются в каждой цепи три э. д. с. вместо традиционных двух э. д. с.

Упрощения (8) позволили наглядно изобразить на рис. 2 слагаемые энергии  $W_1 + W_{12}$  и  $W_2 + W_{12}$ . Согласно традиционной формуле (1) и (10) они получаются отрицательные, что неприемлемо. Кстати, эти слагаемые энергии могут быть выведены из системы при мгновенных разрывах либо  $i_1$ , либо  $i_2$ .

Таким образом, формула (9) и построенные на ее основе графики приобретают широкое значение для расчетов ранее указанных аппаратов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Максвелл К. Трактат об электричестве и магнетизме. Т. 2.— М.: Наука, 1989.
- Cohn E. Das elektromagnetische Feld.— Berlin: Verlag von Julius Springer, 1927.
- Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. Ч. 1.— М.— Л.: Энергия, 1965.

[30.10.91]

# Из истории электротехники

УДК 537.2(091)

## Электростатическая индукция и электрофор в опытах XVIII в.

КРЫЖАНОВСКИЙ Л. Н.

Термин «электростатическая индукция» (наведение зарядов разного знака на противоположных участках поверхности проводника в электростатическом поле) введен Майклом Фарадеем (1791—1867) [1, с. 478], но опыты, основанные на этом явлении, проводились еще в XVII в. В первом из известных опытов такого рода немецкий инженер, физик и бургомистр в одном лице Отто фон Герике (1602—1686) обнаружил, что наэлектризованный трением серный шар передает свою способность притягивать легкие тела льняной нитке, свисающей с палки, если поднести шар к верхнему концу нитки и даже не касаться ее [2, с. 147—150] (при высоких напряжениях, имеющих место при электризации трением, льняная нитка ведет себя как проводник).

Более осознанно наблюдал электростатическую индукцию английский ученый Стивен Грэй (1666—1736). Источником заряда в его опытах служила стеклянная трубка или палочка, которые электризовались трением. 5 августа 1729 г. Грэй «показал, что электричество можно передавать, не касаясь линии передачи трубкой, а только держа трубку близ линии» [3].

В 1730 г. Грэй осуществил опыт с «электрическим мальчиком», как сказано в предметном указателе журнала [3]. Грэй натянул две шелковые веревки на одинаковой высоте и положил на них мальчика лет восьми—девяти лицом вниз так, чтобы одна веревка проходила под грудью, а другая — под бедрами. Перед лицом мальчика располагалась дощечка с латунными листками. При приближении наэлектризованной трубки к ногам изумленного мальчика листки подлетали к его лицу на высоту 20—25 см.

Ознакомившись с этим опытом, Шарль-Франсуа де Систерне Дюфе (1698—1739) решил проделать его на себе. Для этого французский ученый устроился на натянутых шелковых веревках (точнее, на деревянном щите с покрывалом, который висел на веревках). И тут-то произошло доселе неведомое явление: когда один ассистент поднес наэлектризованную трубку к рукам и лицу Дюфе, то между рукой другого ассистента, Жана-Антуана Нолье (1700—1770), находившегося со стороны ног Дюфе, и телом Дюфе неожиданно с шумом проскочила искра. Дюфе и Нолье испытывали при этом несильную боль, как от булавочного укола или искры от огня. Электрическая искра извлекалась подобным способом и сквозь одежду, и из голого тела.

Дюфе опубликовал этот опыт в трудах Парижской академии наук за 1733 г. [4] и сообщил о нем в письме в Англию от 27 декабря 1733 г., которое Лондонское Королевское общество (академия наук) также опубликовало [5].

Весной 1734 г. Грэй решил воспроизвести опыт Дюфе. На сей раз у Грэя не оказалось достаточно

прочных шелковых веревок, поэтому он не подвесил «электрического мальчика», а поставил его на изолирующую подставку и тоже успешно извлек искру из него [6].

Вот так успешно протекало заочное сотрудничество Грэя и Дюфе — людей разных национальностей, разного возраста и разного социального положения: Грэй был выходцем из ремесленников, а с 1719 г. пенсионером благотворительного Чартерхауса в Лондоне; Дюфе же был дворянином, с 1723 г. членом Парижской Королевской академии наук, а с 1732 г. заведующим Королевским ботаническим садом.

В 1737 г. немецкий физик Георг Маттиас Бозе (1710—1761) повторил опыт Дюфе по извлечению искр из человека, добившись более сильного эффекта благодаря применению вместо стеклянной трубы электризационной машины на основе вращаемого стеклянного шара [7, с. 277—278].

О том, какое впечатление производили в первой половине XVIII в. опыты с извлечением искр из человека, можно судить по следующему отрывку, которым начинается книга Христиана Готтлиба Кратценштейна (1723—1795, с 1748 по 1753 г. в Петербурге), написанная в форме писем к коллеге-медику в стиле, характерном для того времени: «Поверите ли тому, что я скажу Вам. Люди теперь научились делать себя такими страшными, что Вы не сможете прикоснуться к ним, не подвергнув себя опасности того, что из них выйдет пламя, как из горы Эtnы. Если не знать, что они из мяса и кости, то можно подумать, что попал в общество злых духов» [8, с. 3].

В 1743 и 1744 гг. Кратценштейн помогал в электрических исследованиях своему учителю, профессору университета в Галле Иоганну Готтлобу Крюгеру (1715—1759) [9, с. 11]. Эти исследования рассматриваются историками как первая попытка применения электричества в медицине. Их инициатором был Крюгер. Вот как он пришел к мысли об электролечении.

Ученый заметил на теле человека пятно от электрической искры. «Если электричество может не только вызывать пятна на коже,— рассуждал Крюгер,— но и распространяться по всему телу, то не несомненно ли, что электризацией можно вызвать изменения и во внутренних частях человеческого тела, где угодно. Однако все, что может вызвать изменения в человеческом теле, можно использовать для восстановления потерянного или сохранения имеющегося здоровья, если только пользоваться этим вовремя и в нужных местах. Не следует ли отсюда, что электризация является новым видом лечения?,— заключает Крюгер в послании, датированном 21 декабря 1743 г. [10, с. 23].

Вернемся, однако, к опытам Грэя.

В 1735 г. Грэй со своим другом священником Грэнвиллом Уиллером (1701—1770) подвесил горизон-

тально на шелковых шнурках железный стержень диаметром 1/2 дюйм (1,3 см) и длиной 4 фут (1,2 м). К одному концу стержня экспериментаторы подносили наэлектризованную стеклянную трубку, при этом ночью было видно свечение у концов стержня и было слышно шипение. Когда к другому концу один из экспериментаторов подносил палец или щеку, то между концом стержня и пальцем или щекой с шумом проскакивала искра.

Итак, «искрометный» опыт был проведен сначала с человеком (Дюфе), а лишь затем с металлическим стержнем.

В 1729 г. Грэй сделал открытие, которое не сразу было оценено по достоинству. В современных терминах это открытие из области электростатики формулируется так: свободные заряды в электростатическом поле находятся только на поверхности проводников. К подобному выводу Грэй пришел на основании следующего опыта.

Грэй подвесил на изоляторах рядом друг с другом два равновеликих куба из дерева (очевидно, непропущенного): один сплошной и один полый. Поднося наэлектризованную стеклянную трубку между кубами и симметрично над ними, Грэй обнаружил, что и тот и другой кубы одинаково притягивают находящиеся под ними кусочки фольги.

Грэй объяснял свои опыты погружением одних тел в «электрическую атмосферу» других. Предпосылки для подлинного объяснения различных электрических опытов создал Дюфе, который в 1733 г. открыл два вида электричества: стеклянное и смоляное, или, по позднейшей терминологии Бенджамина Франклина (1706—1790), положительное и отрицательное. Франклин исходил из наличия в телах «электрического флюида», избыток которого означает положительный заряд, а недостаток — отрицательный. Знаки зарядов Франклин выбрал на основе визуального наблюдения: ученыму казалось, что электрическая искра выходит из одних тел и входит в другие. Первые он назвал положительно заряженными, а вторые — отрицательно заряженными. Применяемые в наши дни знаки зарядов соответствуют позднейшей номенклатуре Франклина (ученый изменил свою первоначальную номенклатуру). Теория Франклина получила название унитарной, потому что в ее основе положен электрический флюид одного вида [11].

В 1759 г. английский ученый Роберт Симмер (ок. 1707—1763) опубликовал теорию, согласно которой в любом теле имеется два вида электричества («+» и «-»), а заряд тела обусловлен их избытком или недостатком [12]. Унитарная и дуальная теории соперничали друг с другом с переменным успехом. Характерно, что Франклин не настаивал на исключительности своей теории и оказывал Симмеру техническую помощь с целью выяснения истины.

Рассмотренная выше экспериментальная конфигурация в виде длинного изолированного проводника в поле заряда, расположенного у конца проводника, применялась Джоном Кэнтоном (1718—1772) в 1753 г. и Франклном в 1755 г. [11, с. 135—149]. К концу полого металлического цилиндра подвешивались проводящие нити, оканчивающиеся пробковыми шариками (у Кэнтона), или пучки влажных нитей (у Франклина). Нити (с шариками) служили индикаторами электричества: при наличии заряда нити расходились. Поднося наэлектризованную стеклянную трубку («+») или сургучовую палочку («-») к концу цилиндра, не снабженному нитями, исследователи наблюдали расхождение нитей на противоположном конце. Из пояснений Франклина следовало, что заряды, возникавшие на концах цилиндра, были противоположного знака.

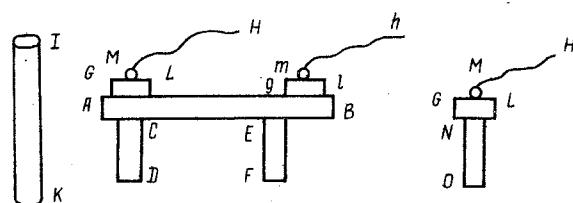
Свои опыты Кэнтон провел в связи с исследованиями по атмосферному электричеству: Кэнтона интересовало, что происходит в изолированных металлических шестах (незаземленных «громоотводах») под действием грозовых облаков, которые имитировались наэлектризованными стеклянной трубкой или сургучовой палочкой. Задача, которую ставил перед собой Кэнтон, состояла в «дальнейшем подтверждении выводов г-на Франклина о положительном и отрицательном состоянии облаков» [11, с. 135]. Франклин же провел свои опыты «в развитие опытов г-на Кэнтона» [11, с. 144], будучи явно не удовлетворенным его туманными объяснениями.

Франклин показал возможность зарядки проводника в подобных опытах: пусть произойдет разделение зарядов в проводнике, определяемое по расхождению нитей на обоих его концах. Прикоснемся кратковременно к концу, удаленному от источника заряда, при этом проскочит искра. Тем самым мы отведем заряд с конца проводника в землю, что будет видно по опусканию нитей. Если теперь убрать источник заряда, то нити вновь разойдутся, так как проводник в целом окажется заряженным со знаком, противоположным знаку заряда, отведенного в землю [11, с. 147].

Франклинские взгляды и методика получили развитие в работах Франца Ульриха Теодора Эпинуса (1724—1802, с 1757 г. в России), который стал вторым профессиональным электрофизиком Петербургской Академии наук после Г.-В. Рихмана (1711—1753), погибшего при исследованиях атмосферного электричества.

Эпинус четко описал разделение зарядов в проводниках при электростатической индукции, иллюстрируя это явление следующим опытом: «Надлежит повесить на шелковых нитях или поставить на стеклянных подставках какую-нибудь металлическую призму и к одному ее концу должно принести стеклянную трубку или трением наэлектризованный серный цилиндр, и в расстоянии двух или одного дюйма неподвижно держать; тогда увидишь, что все сие тело будет иметь электрическую силу; но притом одна сторона — положительную, а другая — отрицательную» [13, с. 400]. У Эпинуса встречается важное замечание, связанное с современным понятием электрической емкости. Ученый пишет о соприкосновении заряженного проводящего тела *A* с незаряженным проводящим телом *B*: «Если тело *B* будет очень большим по сравнению с телом *A* или если *B* будет соединено с земным шаром через посредство других тел, неэлектрических по своей природе [т. е. проводников — *Л. К.*], то электричество поглотится [...]» [13, с. 194].

Весьма любопытен следующий опыт Эпинуса (см. рисунок): «Положим на стеклянные подставки *CD* и *EF* металлический прут *AB*, имеющий в длину приблизительно 1 фут, и на один из его концов положим какой-нибудь металлический бруск *GL*, имеющий в длину приблизительно  $1\frac{1}{2}$  дюйма, с крючком *M* посередине, к которому привязана хорошо высушенная шелковая нить *NM*. Затем возьмем стеклянный электризационный цилиндр *IK* и, после того как он будет наэлектризован трением, поднесем его примерно на расстояние 1 дюйм к концу прута *A*, и пусть он остается неподвижным



в таком положении. Затем поднимем в воздух, с помощью шелковой нити *NM*, кусок металла *GL* и положим его на какую-нибудь стеклянную подставку *NO*. Если подвергнуть исследованию тело *GL*, то оно окажется электрическим, и притом отрицательно электрическим. Для второго опыта пусть все останется таким же, как было описано; стеклянную трубку *IK* снова поднесем к концу *A*, но тело *GL* положим на другой конец прута *B*; если все останется как в предыдущем опыте, то тело *gl* (то же, что *GL*), будучи положено на подставку *NO*, опять станет электрическим, но будет уже обладать электричеством, противоположным тому, что прежде, т. е. положительным» [13, с. 133—134]. Поставив *GL* на *B*, коснувшись *B* проводником и убрав затем *GL* на *NO*, Эпинус получил примерно нулевой заряд *GL*.

Все эти опыты способствовали не только утверждению теории Франклина, но и изобретению электрофора — электростатического генератора, основанного на явлении индукции.

Созданию электрофора предшествовал также опыт Джован-Франческо Чиньи (1734—1790). Итальянский физик подносил снабженную изолирующей ручкой металлическую пластину к наэлектризованной шелковой ленте, при этом лента прилипала к пластине, а из пластины можно было извлечь пальцем искру. Отделив ленту от пластины, можно было убедиться, что лента осталась заряженной, как и прежде, а пластина оказалась заряженной с противоположным знаком. Из пластины можно было снова извлечь искру и повторить опыт много раз. На основании этого опыта Чинья отстаивал свой приоритет на электрофор [14, с. 181], хотя изобретение прибора в завершенном виде, датируемое 1775 г., принадлежит Alessandro Вольте (1745—1827).

Полное итальянское название прибора — *elettroforo regretoio*, т. е. «вечный электроноситель». В электрофоре заряд, получаемый потиранием диэлектрической пластины, не расходуется как токовой. Он служит только для разделения зарядов (вследствие электростатической индукции) в находящейся над ней металлической пластине. Коснувшись металлической пластины, мы отводим заряд из ее верхнего приповерхностного слоя в землю, в результате чего пластина оказывается заряженной. (При больших размерах электрофора отводить заряд в землю через свое тело не безопасно, и в этом случае следует предусмотреть специальный разрядник.) Металлическую пластину кладут обратно; и описанную процедуру можно повторять многократно, каждый раз получая на пластине почти неизменный заряд.

Летом 1776 г. электрофор небольших размеров был привезен из Вены в Петербург [15]. Изучив его, механик Петербургской Академии наук И. П. Кулибин (1735—1818) по приказу императрицы Екатерины II в том же году изготовил «царь-электрофор», описанный в трудах академии за 1777 г. [16]. Кулибинский электрофор, как отмечается в трудах академии, был самым крупным в мире. Он состоял из двух металлических пластин в виде овалов или прямоугольников с закругленными углами. Нижняя пластина имела размеры  $2,7 \times 1,4$  м. На ее заливку (для получения диэлектрика) пошло 74 кг смолы и 33 кг сургуча. Верхняя пластина, подвешенная на шелковых веревках, поднималась и опускалась посредством системы блоков. Электрофор был установлен во дворце императрицы в Царском Селе (ныне г. Пушкин). Императрица и придворные любовались огромными искрами при разряде электрофора. Впоследствии прибор был перевезен в физический кабинет при Академии наук, где находился до начала XIX в. ( дальнейшая судьба неизвестна).

Изобретение электрофора не только расширило экспериментальные возможности исследователей, но и послужило толчком к созданию новых электростатических генераторов, в том числе не утратившего значения и в настоящее время генератора Ван-де-Графа, развивающего напряжение до 20 МВ (проект — до 30 МВ).

Итак, опыты, основанные на электростатической индукции:

способствовали кристаллизации понятий «проводник» и «непроводник»;

способствовали утверждению понятия двух видов электрического заряда («+» и «—»);

позволили извлекать искры из проводников, включая тело человека;

стимулировали зарождение электромедицины;

дали способ зарядки проводника, находящегося в электростатическом поле, путем отвода в землю разделенного заряда одного знака;

привели к изобретению электрофора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фарадей М.** Экспериментальные исследования по электричеству.— Т. 1 / Пер. с англ. Е. А. Чернышевой и Я. Р. Шмидт-Чернышевой; комм. и ред. Т. П. Кравца.— Л.: Изд-во АН СССР, 1947.— 848 с.
2. **Гюрик О. в.** Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio.— Amsterdam: Jansson, 1672.— 244 р.
3. **Греј С. А** letter (...) containing several experiments concerning electricity // Phil. Trans.— 1731 & 1732.— Vol. 37.— P. 18—44.
4. **Дю Фей Ч.-Ф. де С.** Quatrième mémoire sur l'électricité // Mémoires de l'Acad. (...) Paris.— 1733.— P. 457—476.
5. **Дю Фей Ч.-Ф. де С.** A letter. (...) concerning electricity. Translated from the French (...) // Phil. Trans.— 1733 & 1734.— Vol. 38.— P. 258—266.
6. **Греј С.** Experiments and observations upon the light that is produced by communicating electrical attraction to animal or inanimate bodies (...) // Phil. Trans.— 1735&1736.— Vol. 39.— P. 16—24.
7. **Гралат Д.** Geschichte der Electricität // Versuche und Abhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Danzig.— 1747.— 1. Theil.— S. 175—304.
8. **Кратценштайн С. Г.** Abhandlung von dem Nutzen der Electricität in der Arzneywissenschaft.— 2. Aufl.— Halle: Hemmerde, 1745.— 26 S.
9. **Сноррассон Е. С. Г.** Kratzenstein professor physices experimentalis Petropol. et Havn. and his Studies on Electricity during the 18th Century.— Odense University Press, 1974.— (Acta Historica Scientiarum Naturalium et Medicinalium, edidit Bibliotheca Universitatis Hauniensis.— Vol. 29).— 206 pp.
10. **Крюгер Ј. Г.** Zuschrift an seine Zuhörer worinnen er ihnen seine Gedanken von der Electricität mitteilt.— Halle: Hemmerde, 1744.— 32 S.
11. **Франклин В.** Опыты и наблюдения над электричеством / Пер. с англ. В. А. Алексеева; ред., ст. и комм. Б. С. Сотина.— М.: Изд-во АН СССР, 1956.— 272 с.
12. **Симмер Р.** New experiments and observations concerning electricity. Paper IV. Part I. Of two distinct powers in electricity // Phil. Trans.— 1759.— Vol. 60.— Pt. I.— P. 371—380.
13. **Эпинус Ф. У. Т.** Теория электричества и магнетизма / Ред. и прим. Я. Г. Дорфмана.— Л.: Изд-во АН СССР, 1951.— 564 с.
14. **Льюис М.** История физики / Пер. с итал. Э. Л. Бурштейна.— М.: Мир, 1970.— 464 с.
15. **Ченакал В. Л.** Электрические машины в России XVIII в. // Тр. Ин-та истории естествознания и техники.— 1961.— Т. 43.— С. 50—111.
16. **Electrophore régétuel** // Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae.— 1777.— Pars. 1.— P. 70—71.

# Хроника

УДК 621.3:930

## На Фарадеевской конференции

22 сентября 1791 г. в Лондоне родился один из величайших физиков — Майкл Фарадей. Журнал «Электричество» своевременно отметил эту дату статьей Я. А. Шнейберга (1991, № 8). Сегодня мы познакомим читателя с посвященной Фарадею научной конференцией. Она состоялась 30—31 октября в Институте истории естествознания и техники (ИИЕТ) им. С. И. Вавилова. В организации ее принимали также участие Московский энергетический институт, редакции журналов «Электричество» и «Вопросы истории естествознания и техники».

Конференцию открыл заведующий сектором истории физики, механики и астрономии ИИЕТ В. П. Визгин. Он напомнил, что 10 лет назад в Институте была проведена конференция, посвященная 150-летию со дня рождения Максвелла и открытия электромагнитной индукции Фарадеем.

В творчестве Фарадея, как ни у кого другого, сфокусировано блестящее экспериментальное мастерство, глубокий теоретизм мышления, неявная математизация, техническая изобретательность. В последние годы начато исследование гуманитарных и социальных аспектов творчества Фарадея, что нашло отражение в некоторых докладах данной конференции.

В выступлениях на первом заседании были даны обобщающие оценки главнейших достижений Фарадея с точки зрения современной физики и электротехники. Доклады чл.-корр. АН СССР В. В. Микулина «Фарадей и физика» и проф. А. В. Нетушила «Фарадей и проблемы современной теоретической электротехники» опубликованы в настоящем номере журнала. В связи с докладом А. В. Нетушила академик А. Ю. Ишлинский отметил некоторые элементы параллелизма в развитии электротехники и механики.

В докладе доц. Я. А. Шнейberга был описан путь переплетчика Фарадея в науку и дана суммарная характеристика его вклада в электротехнику. Его опыты 1821 г. дали прообраз электродвигателя. Развитие электротехники как самостоятельной отрасли науки берет свое начало с открытия Фарадеем электромагнитной индукции в 1831 г. и опыта с так называемым диском Фарадея — первой конструкцией генератора. Из опытов Фарадея вытекал также принцип работы трансформатора. Таким образом, все важнейшие элементы современного электротехнического оборудования созданы на основе открытых Фарадея, а радиотехника выросла из развития его теоретических представлений о электромагнитных процессах в веществе и вакууме. Доктор хим. наук А. М. Скундин подчеркнул два важнейших достижения в электрохимическом цикле опытов Фарадея. Первое — установление основного закона электрохимии, поставившего эту науку на путь точного количественного исследования. Успеху установления пропорциональности химических и электрохимических эквивалентов способствовал удачный выбор ионов серебра. С двух- и трехвалентным железом или

с водой (обратный ход реакции у электродов) точной пропорциональности не получилось бы. На основании этого результата Фарадей пришел к выводу о существовании элементарного электрического заряда, как в дальнейшем выяснилось, заряда электрона. Понятие о неделимом атоме теряло смысл. И второе — решение «проблемы Вольта»: электрический ток в гальваническом элементе поддерживается электрохимическим процессом, а не контактной разностью потенциалов двух металлов, что было бы «с сотворением силы». Этот вывод был сделан в 1834 г., т. е. до Р. Майера.

В последнем докладе на этом заседании канд. пед. наук Р. Н. Щербаков из Таллина познакомил слушателей не только с лекционной работой Фарадея в Лондонском Королевском институте и в Королевской военной академии в Вулвиче, но и с его дидактическими и методическими идеями, изложенными, в частности, в лекциях для детей и не потерявшими и сегодня своего значения.

Доклады на следующих двух заседаниях были посвящены более узким и конкретным вопросам. Доктор физ.-мат. наук Л. А. Шувалов из Института кристаллографии рассмотрел бурющую свою начало от Фарадея и бурно развивающуюся историю сегнетоэлектриков. В связи с болезнью академика Армении А. Г. Иосифьяна доктор физ.-мат. наук Н. П. Коноплева, по его просьбе, ознакомила конференцию с его публикациями 1987 и 1989 гг. в журнале «Электричество» о физических основах фарадеево-максвелловских силовых линий в свете гипотезы Дирака и природе электромагнитных явлений. Со своей стороны, Н. П. Коноплева сопоставила гипотезу Дирака с идеями, высказанными в одной забытой статье В. Ф. Миткевича. Эта проблематика вызвала ряд вопросов к Н. П. Коноплевой и эмоциональную дискуссию, связанную с воспоминаниями о резкой конфронтации между В. Ф. Миткевичем и физиками-теоретиками в 1930—1940 гг. С критическими замечаниями выступили доктор физ.-мат. наук Я. А. Смородинский и В. П. Визгин.

В докладе В. П. Визгина «Понятие электротонического состояния и современная теория поля» основное внимание было сосредоточено на идеяных корнях введения Фарадеем понятия электротонического состояния — прообраза векторного потенциала — как ключевого момента в генезисе фарадеево-максвелловской концепции электромагнитного поля. Со временем Фарадея оно претерпело эволюцию: фундаментальная роль у Фарадея и Максвелла, ее утрата у Герца и Хевисайда и восстановление этой роли в современной теории поля в ее калибровочной формулировке, что окончательно вычислялось после опытов Ааронова и Бома. Согласно В. П. Визгину существует органический параллелизм свойств электротонического состояния с характерным для романтиков противопоставлением наблюдавших феноменов и скрытых сущностных состояний, которые при своих резких изменениях порождают эти феномены.

Имеется достаточно косвенных аргументов в пользу того, что Фарадей испытывал влияние романтических идей.

Канд. физ.-мат. наук Г. Е. Горелик в докладе «Фарадей и теоретическая физика XX века» сопоставил два разных подхода — И. Е. Тамма и В. Ф. Миткевича — к творческому наследию Фарадея. Первый основное внимание уделял «внутренней энергии» работ Фарадея, руководящим идеям, без которых невозможно никакое глубокое исследование. А второй использовал авторитет Фарадея для защиты и утверждения собственных взглядов, соответствующих некоторым его высказываниям, но к 30-м годам уже ставшим анахронизмом. По мнению докладчика, этот пример демонстрирует два общих типа историко-научной интерпретации трудов предшественников.

Утреннее заседание 31 октября началось с доклада проф. И. П. Копылова «Фарадей и современные униполярные машины», который был перенесен с первого заседания по его просьбе. Он не ограничился историческим обзором и посвятил значительную часть доклада обоснованию возможности использования вращения Земли для получения электрической энергии по принципу фарадеевской униполярной машины (так называемого диска Фарадея). Затем в соответствии с программой канд. физ.-мат. наук Ю. Л. Менцин дал аналитический обзор основных направлений зарубежных исследований, опубликованных после выхода в свет в 1965 г. фундаментальной монографии «Майкл Фарадей» английского историка науки Л. П. Вильямса. Докладчик отметил, что ведущей тенденцией современной западной «фарадеистики» является социально-исторический подход, позволивший, во-первых, детально исследовать культурные, философские и религиозные предпосылки творчества Фарадея; во-вторых, заполнить «лакуны» между экспериментальными исследованиями Фарадея и созданием Максвеллом теории электромагнитного поля, в частности, детально раскрыть роль В. Томсона в математизации экспериментальных результатов Фарадея; в-третьих, проанализировать эксперименты Фарадея в контексте реализации программы, ставящей задачу социологической интерпретации научного знания. Далее канд. физ.-мат. наук О. А. Лежнева рассказала о двух аспектах восприятия открытий Фарадея в России. Если на открытие Эрстеда оперативно откликнулись только московские журналисты, то открытие электромагнитной индукции не только пропагандировалось. К этому времени в Академии наук возродился физический кабинет, где были выполнены исследования Ленца, существенно продвинувшие изучение этого явления, а также первых поколений генераторов переменного тока.

С большим интересом был выслушан доклад проф. Л. С. Полака — председателя секции физики Советского национального комитета по истории и философии естествознания и техники на тему «Фарадей и Гамильтон». Им были рассмотрены взаимоотношения двух выдающихся представителей британской науки — англичанина Фарадея и ирландца Гамильтона. Различие темпераментов не помешало плодотворности их контактов. Были проанализированы их взгляды на строение эфира, на атомистическую теорию, на теорию Р. Бушковича, охарактеризованы их выступления на химической секции Британского общества содействия развитию науки. Показано, что, отталкиваясь от различных исходных концепций, Фарадей и Гамильтон пришли к весьма близким взглядам на строение светоносного эфира.

Канд. физ.-мат. наук Б. В. Булюбаш в докладе «Фарадей и Фехнер» подверг сравнительному анализу взгляды Фарадея и его немецкого современника

Г. Т. Фехнера на электрические явления, их отношение к теории Р. Бушковича: оно было положительным — оба были динамисты.

В докладе Ю. А. Любимова «Электростатическая модель Фарадея и ее теоретическое развитие Грином и Моссотти» были прослежены дофарадеевские представления Кулона и Пуассона, создание фарадеевской модели. Ее дальнейшее развитие связывают с именами Моссотти (1846 г.) и Клаузиуса (1879 г.). Но Ю. А. Любимов установил, что за десять лет до Моссотти сходная работа была выполнена соотечественником Фарадея Дж. Грином. В дальнейшем эти исследования были продолжены Максвеллом и Дебаем применительно к поведению диэлектриков в переменных электрических полях.

В программу конференции был включен доклад четырех физиков — докторов физ.-мат. наук Б. И. Болотовского, М. Л. Левина, М. А. Миллера и канд. физ.-мат. наук Е. И. Суворова; осуществивших в 1989 г. издание полного перевода знаменитого «Трактата» Максвелла, на тему «Идеи Фарадея в «Трактате» Максвелла». Этот доклад не состоялся, однако единственный представитель этой группы М. Л. Левин представил очень интересное выступление. На примере распространенных штампов в биографиях Фарадея он продемонстрировал необходимость демифологизации истории науки. К числу таких штампов, прозвучавших, в частности, в докладе Я. А. Шнейберга, относятся, по мнению докладчика, перекосы в освещении взаимоотношений Дэви и Фарадея — недооценка положительной роли Дэви в судьбе Фарадея и сгущение красок в описании трудностей его научной карьеры. На основании блестящей основанной на конкретных факторах характеристики социальных и экономических условий работы Фарадея в Королевском институте М. Л. Левин пришел к выводу, что они были вполне благоприятны. Что касается скромности образа жизни Фарадея, то он был связан не с недостатком материальных средств, а с его религиозными убеждениями.

Кандидат физ.-мат. наук Н. В. Вдовиченко сделала доклад о работах Фарадея по сжижению газов. Первая серия опытов была проведена в 1823 г. — по заданию Дэви был получен жидкий хлор. Во второй серии, предпринятой Фарадеем по собственной инициативе, была сделана попытка сжижения других газов и было показано, что при достижимых в то время отрицательных температурах ( $-166^{\circ}$ ) и давлениях (вплоть до 5 МПа) ни кислород, ни водород, ни азот сжижать не удается. Часто встречающееся утверждение, что Фарадей установил невозможность перевести газ в жидкость только посредством сжатия, неверно. Эта закономерность была открыта еще в 1823 г. Каньяр де Латуром, а Фарадей прошел мимо этого факта. Сам Фарадей прекрасно понимал значение своих результатов и предпочитал скорее отказаться от приоритета, чем, не дай Бог, приписать себе чужую славу.

В дополнительно включенном в программу докладе Н. Т. Маркчева «Индукция электрических токов: эксперимент и закон Фарадея, теория Максвелла, применение теории» был дан сравнительный анализ различных формулировок закона индукции у самого Максвелла, у Хэвисайда, в учебниках по электродинамике (в дифференциальном и интегральном вариантах).

Конференция завершилась проведением круглого стола на тему «Фарадей и эксперимент в физике», организованном Ю. Л. Менциным. В его проведении участвовали исследователи, интересующиеся философско-методологическим аспектом проблемы соотношения эксперимента, теории, практики — В. В. Мигулин, А. В. Нетушил, В. П. Визгин, Г. М. Идлис, О. А. Лежнева, Е. И. Погребысская, Н. В. Вдовиченко,

О. Д. Симоненко, Л. И. Верховский и др. В. П. Бизгин обратил внимание на то, что экспериментальный подход Фарадея лежал вне складывавшегося уже стремления к точным измерениям, к количественным результатам, хотя он хорошо знал работы современников. Ю. Л. Менчин, однако, считает, что тщательное подробное описание опытов, «буквальное описание», имеет свои преимущества. О. А. Лежнева высказала мнение о том, что Фарадей был, видимо, последним сторонником «буквального описания», характерного для ученых XVII—XVIII вв. После введения в физику абсолютной системы мер, эталонов, точных измерительных приборов оно потеряло право на существование, что не исключает необходимости внимательного отношения экспериментатора к «случайным» наблюдениям, не соответствующим ожидаемым результатам.

Е. И. Погребысская отметила целеустремленность и методичность в сериях опытов Фарадея, перекликающихся по стилю с опытами его соотечественника Д. Брюстера, который обнаружил двоякопреломление кристаллов — одноосных и двуосных (1815 г.), что стало возможным благодаря последовательному проведению анализа множества кристаллов. Н. В. Вдовиченко добавила, что этот стиль был присущ Фарадею и в химических исследованиях. О. Д. Симоненко обратила

внимание на интересный эпизод. Открытие электротехниками принципа самовозбуждения электрических машин вызвало у В. Сименса предположение, что речь идет о принципиально новом явлении, сопоставимом с открытием Фарадеем электромагнитной индукции. Однако Максвелл разъяснил, что все объясняется в рамках его теории.

Итоги конференции были положительно оценены ее участниками. Введены в оборот новые факты и идеи. В связи со снятием идеологического давления стали возможны более адекватные оценки мировоззрения Фарадея.

В прошлом научные центры по истории науки и техники возглавляли и сами в них работали как историки такие крупнейшие ученые, как А. Н. Крылов, С. И. Вавилов, В. И. Смирнов, Х. С. Коштоянц, Б. Н. Юрьев, Т. П. Кравец, который, в частности, подготовил трехтомное издание фарадеевских «Экспериментальных исследований по электричеству». В дальнейшем контакты профессиональных историков тех или иных научных дисциплин с учеными, активно в них работающими, постепенно ослабевали. Принято отметить, что любовь к Фарадею как личности, унаследованная от его современников, и неисчерпаемость его научного наследия смогли вновь собрать вместе специалистов современной физики, химии, электротехники и историков науки и техники.

ЛЕЖНЕВА О. А., канд. физ.-мат. наук

УДК 621.3(081)(049.3)

## К двадцатилетию «Сборника научно-методических статей по преподаванию электротехники»

20 лет прошло с момента организации и выпуска Сборника научно-методических статей по преподаванию электротехники в вузах страны. Сборник начал свое существование еще при комиссии, а в дальнейшем при научно-методическом совете по электротехнике при Минвузе СССР, а затем при Государственном комитете по народному образованию СССР. В основном, выпуск Сборника были, как правило, ежегодно. Первые девять выпусков, выходившие в издательстве «Высшая школа», издавались как научно-методические по преподаванию электротехники. Следующие четыре выпуска были тематическими научно-методическими, а в дальнейшем и по настоящее время выпуски вновь стали научно-методическими. Состав редакции Сборника по 15-ти выпускам: председатель — проф. Волынский Б. А.; члены редакции — профессора Герасимов В. Г., Меньшов Б. Г., Нетушил А. В., Рекус Г. Г., ответственный секретарь — доцент Сергеева И. В. Следует указать, что на первые пять выпусков была написана рецензия в журнале «Вестник высшей школы» заслуженным деятелем науки и техники проф. Вениковым В. А. Поэтому настоящая статья в основном относится к последующим 10-ти выпускам.

Тематические сборники были посвящены таким разделам: теория цепей; трансформаторы и электрические машины; электроника и измерения; элементы электрооборудования; применение вычислительной техники. Курс «Электротехника и основы электроники» читается в соответствии с указанными разделами.

В начале рассмотрим содержание тематических сборников. Ряд интересных статей помещен в выпуске «Теория цепей». Внимание заслуживают статьи по четырехполюсникам. К ним относятся «Изложение теории четырехполюсника в электротехнике» (авторы Нетушил А. В., Лычина Г. П.). В статье изложена возможность применения четырехполюсника для составления Т-образной схемы замещения в трансформаторах и электрических машинах. Во второй статье «К расчету к. п. д. и коэффициента мощности четырехполюсника» (авторы Ланген А. М., Каменева В. В.) приводится конкретный пример расчета. В статье о Г-образной схеме замещения трансформатора и асинхронного двигателя (автор Рекус Г. Г.) приводится доказательство того, что эта схема для малых мощностей двигателей, микродвигателей, регулируемых двигателей дает недопустимо большую погрешность при расчете характеристик, а также характеризуется значительной погрешностью при расчете характеристик трансформаторов.

Кроме перечисленных статей и другие публикации представляют интерес. Однако часть из них обладает таким недостатком, как отсутствие сравнения предлагаемых методов с существующими.

Много интересных и оригинальных вопросов было изложено в тематическом выпуске «Трансформаторы и электрические машины». К ним относятся такие статьи как «Линейные асинхронные двигатели» (автор Веселовский О. Н.), в которой рассматриваются различные конструкции и особенности таких двигателей. В ста-

тье «Биротативный генератор переменного тока» (автор Бояр-Сазанович С. П.) рассматриваются различные их системы. Установки таких машин целесообразно применять в местах, которые удалены от мест расположения электростанций. Приводятся характеристики таких машин. Такой генератор представляет собой синхронный генератор двойного вращения. Отмечаются преимущества и недостатки такого генератора, а также сферы применения таких генераторов. В этом же сборнике помещены статьи Нетушила А. В. «О потенциальной и вихревой составляющих напряженности электрического поля в уравнениях трансформатора» и Траубе Е. С. «Усиление методического единства при изучении индуктивных устройств, трансформаторов и электрических машин переменного тока». Первый автор исходит из уравнения Максвелла для системы неподвижных тел, т. е. из уравнения вида

$$\vec{E} = -\operatorname{grad}\phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}.$$

Автор приводит различные варианты рассматриваемых уравнений в различных учебниках и учебных пособиях и приводит уравнения к окончательному оптимальному виду:

для магнитодвижущих сил —

$$\dot{F} = w_1 i_{01} = w_1 i_1 - w_2 i_2;$$

для э. д. с. и напряжений —

$$u_1 = e_1 + R_1 i_1 + L_{d1} \frac{di_1}{dt};$$

$$u_2 = e_2 - R_2 i_2 - L_{d2} \frac{di_2}{dt}.$$

Второй автор анализирует закон Фарадея с учетом условно-положительных направлений э. д. с. в катушке, трансформаторе и машинах переменного тока. На этой основе автор получает уравнения, аналогичные указанным. Следует отметить, что не только в Сборнике, но и в журналах «Электричество» и «Вестник механики» по этому вопросу выступали многие авторы. Некоторые из них придерживались традиционных уравнений, т. е.

$$\dot{F} = w_1 i_1 + w_2 i_2; \quad u_1 = -e_1 + R_1 i_1 + L_{d1} \frac{di_1}{dt};$$

$$u_2 = -e_2 + R_2 i_2 + L_{d2} \frac{di_2}{dt}.$$

Однако большая часть авторов согласна с Нетушилом А. В. и Траубе Е. С.

Интересна статья «О формальном и неточном выводе формулы электромагнитного врачающего момента асинхронного двигателя» (автор Волынский Б. А.). В ней отмечается, что вывод такой формулы основан на формальном равенстве врачающего момента с мощностью электрических потерь, т. е.  $M_{\text{эм}} = \Delta P_{2s} / \omega_1 S_1$ . Кроме того, ток ротора определяется на основе Г-образной схемы замещения, т. е.

$$I_{2s} = U / \sqrt{(R_1 + R_2/S)^2 + (Y_1 + Y_2')^2}.$$

Такой вывод делается почти во всех учебниках и учебных пособиях. Получается так, что в формулу для определения тока ротора входит сопротивление статора. По мнению автора при выводе формулы надо пользоваться формулой  $M_{\text{эм}} = C_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2$ . Сам вывод получается на основе представления тока ротора через закон Ома, а значение  $\cos \psi_2$  определяется через тре-

угольник сопротивлений. В результате получится та же формула момента, но она не будет иметь погрешности и ясна по своему физическому смыслу.

В этом же сборнике рассматриваются вопросы, связанные с расчетами, характеристиками и исследованиями электрических машин (авторы Здрок А. Г., Коген-Далин В. Б., Бусел Н. П. и др., Бубело В. В. и др., Рекус Г. Г.).

Несомненный интерес вызывает сборник, посвященный применению вычислительной техники в электротехнике. В нем опубликована статья Герасимова В. Г., Штейнберга Я. А. «Основные пути совершенствования преподавания электротехники в период перестройки высшего образования», в которой изложены соображения по обеспечиванию научно-обоснованного компьютеризированного учебного процесса. В статье Меньшого Б. Г. и Захарова Е. Д. рассматривается система, обеспечивающая автоматизацию расчетов с использованием вычислительной техники. В статьях Герасимова В. Г. и др., Левицкой Е. А. и др., Горячевой и др., Саликовой И. М. и др., Бабичева и др., Саракулова и др. рассматриваются вопросы применения вычислительной техники при выполнении лабораторных, практических и лабораторно-практических занятий, в основном по цепям постоянного и переменного токов. Вместе с тем следует отметить, что слабо освещены или совсем опущены вопросы контроля.

В статьях Иванова А. А. и др., Остапенкова и др., Душкина и др., Меньшова Б. Г. и других освещено применение вычислительной техники при изучении переходных процессов в цепях постоянного и переменного токов и для решения ряда задач по асинхронным двигателям; в статье Волынского Б. А., Зейна Е. Н. «Условно-логические и расчетно-логические схемы для применения вычислительной техники в электротехнике» приводятся такие схемы, которые являются либо алгоритмами, либо основанием для составления алгоритмов для решения задач. В сборнике помещен ряд и других интересных статей, относящихся к этому разделу.

Все остальные сборники разбиты на разделы, которые в зависимости от их содержания несколько видоизменяются. В отдельных выпусках сборника помещен ряд дискуссионных статей, которые следовало бы обсудить на электротехнических кафедрах вузов. Вместе с тем следует отметить, что три раздела оставались неизменными, а именно: «Методика обучения», «Организация учебного процесса» и «Применение технических средств обучения и вычислительной техники». В этих разделах публикуются такие статьи, как статья Иванова Л. Л. «О методике изложения некоторых вопросов курса «Электротехника», где рассматриваются различные явления (законы Кирхгофа, электромагнитные процессы, четырехполюсники, трансформаторы, синхронные машины и др.) под углом зрения условно-положительных направлений э. д. с., напряжений и токов. Именно здесь были представлены впервые уравнения трансформаторов, которые приведены выше; автор статьи отметил ошибочные утверждения ряда составителей учебников и учебных пособий по перечисленным вопросам. В ряде других статей сборника также изложены вопросы методики обучения электротехники. Например, в восьмом выпуске опубликованы так называемые рабочие программы. В основе таких программ лежат типовая программа, число часов, отведенных по учебным планам, и специфические условия специальности и института. Так, такие программы составлены для специальности 0501 «Технология машиностроения и металлорежущие станки и инструменты» (авторы Зорин Ю. Н. и др.); для технологической специальности (авторы Иванов А. А., Сорочинский А. В.); для строи-

тельной специальности (авторы Иванченко Г. Е., Глушков Г. Н.); для специальности 0531 «Приборы точной механики» (авторы Волынский Б. А. и др.); для горных специальностей (авторы Траубе Е. С., Буланов А. С.); для пищевых технологических специальностей (авторы Ястребов и др.); для химических технологических специальностей (авторы Гринберг Б. В., Краевская Н. П.). К этим же статьям можно отнести статью восьмого выпуска «Опыт преподавания электротехники по единой методической разработке» (авторы Григорьев и др.). В статье приводятся примеры для проведения лекций и практических занятий.

Ряд статей посвящен содержанию методики изложения основ электротехники в курсе «Электротехника и основы электроники». К ним относятся статьи «О методике преподавания электроники в курсе «Электротехника и основы электроники» (авторы Герасимов В. Г. и др.), «Об изложении электроники в курсе «Электротехника и основы электроники» (авторы Давыдов И. В., Сухотский И. К.), «Некоторые вопросы единства изложения разделов электротехники и электроники» (автор Нетушил А. В.) В последней статье особый интерес вызывает причинно-следственные связи между вопросами, возникающими между электротехникой и электроникой, а также обратные связи, возникающие в них.

Не останавливаясь больше на отдельных статьях, отметим лишь, что содержание дает ответы на многие вопросы организации учебного процесса и методики обучения. К ним относятся вопросы: организация проведения лабораторных работ, содержание и проведение самих работ, контроль до и после проведения работ

и составление отчетов по работам; таким же образом строится организация практических занятий; аналогичный алгоритм и проведения лекций; так же подробно рассматриваются вопросы самостоятельных работ студентов и контроля за ними; рассматриваются вопросы по содержанию и приему зачетов и экзаменов. Кроме перечисленных, имеются и статьи по проведению олимпиад по электротехнике, по изложению вопроса электромоделирования, об особенностях обучения на вечерних и заочных отделениях, о применении технических средств и вычислительной техники, о различных методах и расчетах трансформаторов и электрических машин.

Каждый выпуск сборника сопровождается предисловием, которое помогает ориентироваться в публикуемых статьях и позволяет читателю учитывать некоторые рекомендации и замечания редакции.

К сожалению, по статьям, напечатанным в порядке обсуждения, откликов поступает слишком мало. Исключением явилось широкое обсуждение, состоявшееся лишь по трансформаторам.

Следует отметить, что сборник издается на довольно высоком уровне. Отбираемые редакцией статьи позволяют повышать эффективность и качество подготовки инженера (неэлектрических специальностей) по электротехнике. Сборник является важным и ценным научно-методическим пособием для работы электротехнических кафедр вузов страны, позволяет им знакомиться с работой ведущих кафедр и использовать их положительный опыт.

ВОЛЫНСКИЙ Б. А.

## Научно-методическому совету по электротехнике 20 лет

20 лет назад в 1971 г. приказом министра высшего и среднего специального образования СССР был создан Научно-методический совет (НМС) по электротехнике. Он был организован на базе предметно-методической комиссии по общей электротехнике, которую до 1969 г. возглавлял проф. В. С. Пантишин, а с 1969 г. проф. О. Н. Браткова. Перед НМС по электротехнике были поставлены следующие основные задачи: координация научно-методических работ, связанных с совершенствованием электротехнической подготовки студентов неэлектротехнических специальностей вузов страны; методический контроль за изданием учебной литературы по общей электротехнике; совершенствование учебных лабораторий по электротехнике; повышение квалификации преподавателей электротехники; пропаганда передового опыта организации учебного процесса и др.

Преподавание электротехнических дисциплин «Электротехника и основы электроники», «Электротехника и электрооборудование», «Электротехника и электроснабжение» и др. для студентов неэлектротехнических специальностей ведется более чем в 300 вузах. Целью электротехнических дисциплин является теоретическая и практическая подготовка инженеров неэлектротехнических специальностей в области электротехники и электроники в такой степени,

чтобы они могли выбирать необходимые электротехнические, электронные, электроизмерительные устройства, уметь их правильно эксплуатировать и составлять совместно с инженерами-электриками технические задания на разработку электрических частей автоматизированных установок для управления производственными процессами.

НМС по электротехнике и его президиум все годы своего существования прилагал большие усилия к тому, чтобы в учебных планах неэлектротехнических специальностей электротехническая подготовка студентов находила должное отражение. Благодаря этому, в частности, раздел «Основы электроники» преподается студентам большинства неэлектротехнических специальностей. Это находит отражение в программах по электротехническим дисциплинам, разработке которых НМС уделял очень большое внимание. Последняя типовая программа по электротехническим дисциплинам, утвержденная ГУМУ высшего образования Гособразования СССР 21.11.1988 г., предусматривает преподавание следующих четырех разделов: электрические и магнитные цепи; основы электроники и электрические измерения; электромагнитные устройства и электрические машины, прикладные вопросы электротехники.

Особое внимание в программе удалено четвертому

разделу, который обеспечивает профилизацию электротехнической подготовки студентов в зависимости от их специальности. Так, студенты металлургических специальностей в четвертом разделе изучают электрооборудование, электропривод и электроснабжение металлургических заводов.

НМС по электротехнике придает большое значение согласованию методики преподавания электротехнических дисциплин с курсами физики и математики. По инициативе президиума НМС по электротехнике были проведены совместные заседания с президиумами НМС по физике и ТОЭ. На этих заседаниях были обсуждены вопросы изложения разделов «Электричество и магнетизм», «Колебания и волны», «Оптика» и «Физика твердого тела» курса физики, тесно связанные с содержанием электротехнических дисциплин.

НМС по электротехнике считает необходимым вести преподавание электротехнических дисциплин в строгом соответствии с действующими государственными стандартами по терминам, определениям, буквенным обозначениям физических величин и графическим обозначениям электротехнических и электронных устройств. Члены НМС принимали активное участие в разработке и обсуждении проектов новых электротехнических стандартов.

Очень важным направлением работы НМС по электротехнике является методический контроль за изданием учебной литературы по электротехнике. Комиссия совета во главе с проф. А. В. Нетушилом разрабатывает планы издания учебников и учебных пособий, рецензирует планы-проспекты и рукописи книг, готовит рекомендации по их улучшению. Эти рецензии и рекомендации систематически обсуждаются на заседаниях президиума НМС.

Комиссии совета по учебно-лабораторному оборудованию (председатель проф. Г. Г. Рекус) совместно с СКБ Минвуза СССР проделана огромная работа по проектированию универсального стенда по электротехнике типа ЭВ-4, который последние восемь лет изготавливается Опытным заводом МЭИ. Этим заводом выпущено несколько сот таких стендов, которыми оснащены уже десятки электротехнических кафедр вузов страны. В настоящее время разработаны новые универсальные лабораторные обучающие комплексы по электротехнике, в состав которых входят персональные ЭВМ.

НМС по электротехнике уделяет большое внимание компьютеризации учебного процесса, методическому обоснованию дидактической эффективности применения ЭВМ в лабораторно-практических занятиях, использованию технических средств обучения (ТСО). На кафедрах электротехники вузов разработано и используется большое количество обучающих, контролирую-

щих и моделирующих программ для персональных ЭВМ, применение которых повышает мотивацию и эффективность учебных занятий по электротехнике.

Повышение квалификации преподавателей электротехники всегда было в поле зрения Научно-методического совета. Факультеты повышения квалификации в Московском энергетическом, Киевском и Саратовском политехнических институтах переподготовили тысячи преподавателей общезаводотехнических кафедр вузов страны. В МЭИ каждые пять лет проводились все-союзные совещания заведующих электротехническими кафедрами.

НМС по электротехнике регулярно (один раз в два года) проводит пленарные заседания с обсуждением наиболее актуальных и фундаментальных проблем совершенствования электротехнического образования студентов нэлектротехнических специальностей. В состав совета, утвержденного в мае 1989 г., входят 84 члена, из них большинство профессора (43) и ведущие доценты 60 вузов, расположенных в 32 городах.

Практически ежемесячно заседает президиум НМС. На этих заседаниях обсуждаются планы работы совета и девяти его комиссий, учебные планы и программы по электротехнике, рецензии на учебники и учебные пособия, вопросы применения ЭВМ и ТСО в учебном процессе, новые методики обучения, проекты новых лабораторных стендов и обучающих комплексов, проблемы повышения квалификации преподавателей, вопросы организации и проведения студенческих олимпиад по электротехнике, особенности методики вечернего и заочного обучения студентов, гуманитарные аспекты инженерного образования и многие другие вопросы.

Один раз в два года (в промежутках между пленумами НМС) проводятся выездные расширенные заседания президиума совета, на которых обсуждается работа региональных, межрегиональных и городских методических объединений. В рамках этих объединений работают научно-методические семинары, в которых участвуют заведующие кафедрами и ведущие преподаватели электротехнических кафедр. Так, в Москве ежегодно проводятся два заседания городского методического семинара с обсуждением наиболее важных вопросов электротехнической подготовки студентов.

Деятельность научно-методического совета по электротехнике, опыт работы электротехнических кафедр регулярно (с 1973 г.) освещаются в сборниках научно-методических статей по электротехнике (главный редактор проф. Б. А. Волынский).

Деятельность научно-методического совета по электротехнике, на наш взгляд, способствует повышению уровня учебной и научно-методической работы электротехнических кафедр, а следовательно, и уровня подготовки специалистов с высшим образованием.

**ГЕРАСИМОВ В. Г., проф. председатель НМС по электротехнике**

# Учредительная конференция Федерации энергетических и электротехнических обществ (ФЭО)

29 и 30 октября 1991 г. в Санкт-Петербурге состоялись IX Пленум Центрального правления ВНТОЭ и Учредительная конференция Федерации энергетических и электротехнических обществ.

В работе конференции приняли участие энергетики и электротехники, представляющие республиканские, региональные и другие организации НТОЭ.

IX Пленум ЦП ВНТОЭ имени акад. Г. М. Кржижановского подвел итоги работы Общества за 1987—1991 гг. Исходя из предложений научно-технической общественности конференция приняла решение о целесообразности преобразования Всесоюзного научно-технического общества энергетиков и электротехников имени акад. Г. М. Кржижановского в Федерацию энергетических и электротехнических обществ.

С докладом на Учредительной конференции ФЭО выступил чл.-корр. Российской АН (РАН) Н. Н. Тихоедев.

В выступлениях делегатов и участников Учредительной конференции отмечалось, что создание Федерации энергетических и электротехнических обществ вызвано демократизацией общественно-политической жизни страны, образованием суверенных государств, а также стремлением их научно-технической общественности к сохранению единства в решении проблем энергетики и электротехники.

Федерация должна стать творческой общественной организацией, которая на добровольных началах создается ее субъектами — научно-техническими обществами, союзами, профессиональными и другими научно-техническими объединениями ученых, инженеров, специалистов.

Делегаты и участники конференции с тревогой констатировали, что энергетический кризис в стране предопределен тем, что: ввод новых и реконструкция действующих энергетических объектов не покрывает роста энергопотребителей; надежность энергоснабжения многих потребителей резко снижена из-за отсутствия резервов; обеспечение топливом электростанций недостаточно; крайне медленно решается проблема энергосбережения.

Научно-техническая общественность, обеспокоенная этой ситуацией и понимающая свою профессиональную ответственность за состояние и развитие энергетики, решила в рамках Федерации объединить усилия субъектов Федерации в разработке и экспертизе межгосударственной энергетической программы, поиска совместных механизмов ее согласования и реализации.

Как считают участники Учредительной конференции, на смену диктату центральных ведомств должна прийти согласованность энергетической политики, основанная на научном прогнозе реальной потребности общества в энергии, рациональном и взаимовыгодном использовании энергоресурсов, разумном и все более жестком ограничении вредного воздействия энергети-

ческих объектов на окружающую среду, использовании последних достижений науки и техники.

Среди выступивших участников Учредительной конференции ФЭО: председатель Казахского НТОЭ, министр энергетики Казахстана **Б. Г. Нуржанов**; президент Российского НТОЭ, чл.-корр. РАН, ректор ЛГТУ **Ю. С. Васильев**; вице-президент НТСЭ Украины, академик, заведующий отделом Института электродинамики АН Украины **Г. Г. Счастливый**; председатель НТСЭ Узбекистана, заместитель начальника ОДУ Средней Азии **А. А. Хакбердыев**; президент Ассоциации инженеров-электриков, чл.-корр. РАН, главный конструктор ВНИИэлектромаш **Я. Б. Данилевич** и др.

В принятом постановлении зафиксировано создание Федерации энергетических и электротехнических обществ и утвержден Устав новой организации.

Договор об учреждении Федерации энергетических и электротехнических обществ подписали: Белорусское НТОЭ, Казахское НТОЭ, Российское НТОЭ, НТОЭ Таджикистана, НТСЭ Узбекистана, НТСЭ Украины, НТОЭ Татарстана, Московское НТОЭ, Санкт-Петербургское НТОЭ, Иркутское НТОЭ.

На Учредительной конференции и на I Пленуме ФЭО были избраны руководящие и исполнительные органы ФЭО: Совет ФЭО, Президиум, Административный, Научно-технический и Исполнительный комитеты Совета Федерации, а также Ревизионная комиссия.

В дальнейшем к Федерации энергетических и электротехнических обществ намечают присоединиться НТОЭ других республик (государств) и регионов, Светотехническое общество и др.

Президентом Федерации энергетических и электротехнических обществ избран **Н. Н. Тихоедев**, чл.-корр. РАН, заведующий отделом НИИПТ.

Почетным президентом ФЭО избран **Н. Н. Ковалев**, чл.-корр. РАН.

Вице-президентами избраны:

**В. В. Бушуев**, д. т. н., председатель Новосибирского правления НТОЭ, Президент Сибирской ассоциации энергетиков.

**В. Р. Окороков**, д. э. н., профессор ЛГТУ.

**В. И. Радин**, д. т. н., директор ОКБ «Генератор», председатель Московского НТОЭ.

Председателем ревизионной комиссии ФЭО избран **В. Ф. Федоров**, к. т. н., с. н. с. ВНИИэлектромаш.

Председателем Исполнительного комитета Совета ФЭО избран **М. Н. Новиченков**.

Участники Учредительной конференции Федерации энергетических обществ обсудили и приняли обращение к Верховным Советам, Правительствам и научно-технической общественности суверенных государств и республик, в котором указано на крайне тяжелое состояние энергетики страны и намечены пути выхода из кризиса.

**ЛАНДЕР Л. А., вед. инструктор ФЭО**

# Алексей Владимирович Иванов-Смоленский

(К 70-летию со дня рождения)

В феврале с. г. исполнилось 70 лет со дня рождения и 45 лет научно-педагогической деятельности доктора технических наук, профессора кафедры электромеханики Московского энергетического института, почетного профессора Университета Сан-Маркос Республики Перу Алексея Владимиоровича Иванова-Смоленского.

В течение 53 лет Алексей Владимирович работает в области энергетики и электромеханики. Он внес крупный вклад в развитие этих важных научных направлений. Им предложены методы физического моделирования электрических машин в энергосистемах, разработаны принципы проектирования этих машин для физических моделей в энергосистемах. Он создал методы исследования несимметричных электрических машин. В последние годы им сформировано новое направление в области математического моделирования электрических машин, позволяющее наиболее полно по сравнению с существовавшими ранее методами воспроизводить структуру и учитывать насыщение сердечников электрических машин.

Созданные А. В. Ивановым-Смоленским научные методы исследований приобрели широкую популярность среди инженеров и исследователей и принесли ему заслуженный авторитет крупного ученого.

В результате многолетних исследований в области теоретических проблем преобразования энергии в нелинейных электромеханических системах А. В. Иванову-Смоленскому удалось устраниТЬ ряд серьезных противоречий при определении электромагнитных сил и предложить методы расчета электромагнитных сил, напряжений и деформаций в нелинейных магнитных средах.

Глубину теоретических изысканий А. В. Иванов-Смоленский сочетал с оригинальными инженерными разработками.

Под руководством А. В. Иванова-Смоленского и чл.-корр. АН СССР Г. Н. Петрова был разработан и изготовлен на заводе «Уралэлектротяжмаш» опытный высоковольтный гидрогенератор мощностью 14,5 МВт, на котором впервые в мире было получено напряжение 110 кВ, разработан рабочий проект высоковольтного гидрогенератора мощностью 100 МВт на напряжение 165 кВ. Эта большая многолетняя работа, явившаяся новым направлением отечественной электромеханики, требовала решения целого ряда сложных научно-технических задач, развития общих проблем моделирования электрических машин, поиска принципиально новых конструктивных решений.

Талантливый педагог и воспитатель, привлекающий к себе молодежь своим энтузиазмом, неукротимой энергией, исключительно честным отношением к труду, Алексея



сей Владимирович подготовил немало специалистов, работающих во всех уголках нашей страны и за рубежом.

А. В. Ивановым-Смоленским создана научная школа в области электромагнитных расчетов электрических машин, организована научная лаборатория, подготовлено более 30 кандидатов технических наук и один доктор технических наук, проводится большая работа по оппонированию кандидатских и докторских диссертаций.

Проф. А. В. Иванов-Смоленский является одним из ведущих преподавателей МЭИ. Большой вклад внесен им в развитие общего курса электрических машин. Он создал курс «Электромагнитные расчеты», являющийся универсальной базой специальной подготовки инженеров-электромехаников, и был инициатором включения этого курса в учебные программы энергетических вузов страны. На кафедре электромеханики МЭИ под руководством А. В. Иванова-Смоленского создана учебная лаборатория по этой дисциплине.

А. В. Иванов-Смоленский является автором более 150 научных трудов и 16 изобретений, в том числе монографий «Физическое моделирование электрических систем» (совместно с В. А. Вениковым), «Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование», «Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах» (совместно с Ю. В. Абрамкиным, А. И. Власовым, В. А. Кузнецовым); учебника «Электрические машины», переведенного на английский, французский и испанский языки, и ряда учебных пособий.

А. В. Иванов-Смоленский в течение ряда лет активно работает председателем секции электрических машин НТО МЭИ, членом редколлегии научно-технических журналов «Электричество», «Известия вузов. Электромеханика», издательства «Энергоатомиздат», «Мир», членом нескольких секций Научного Совета РАН по комплексной проблеме «Научные основы электрофизики и электроэнергетики».

А. В. Иванов-Смоленский имеет правительственные награды, награжден серебряной медалью ВДНХ, является ветераном труда МЭИ.

Интересный собеседник, чуткий и внимательный человек широкого кругозора и большой эрудиции, Алексей Владимирович является примером бескорыстного служения науке, делу воспитания инженерных кадров.

Многочисленные товарищи, коллеги и ученики Алексея Владимиоровича поздравляют его со славным юбилеем и желают ему здоровья и дальнейших успехов в научно-педагогической деятельности.

**Вниманию руководителей предприятий  
и организаций!**

**Журнал принимает для опубликования объявления о продаже и покупке научно-технической документации, оборудования, аппаратуры, приборов, а также об оказываемых и требующихся услугах и др.**

**Письмо о гарантии оплаты объявления должно быть подписано руководителем и главным бухгалтером организации. Текст объявления необходимо приложить на отдельном листе.**

**Редакционная коллегия:**

**Андерс В. И., Белкин Г. С., Бортник И. М., Борцов Ю. А., Будзко И. А., Бутырин П. А., Гельфанд Я. С.,  
Данилевич Я. Б., Евсеев Б. Н. (зам. главного редактора), Ершевич В. В., Иванов-Смоленский А. В.,  
Ильинский Н. Ф., Иоссель Ю. Я., Комельков В. С., Костенко М. В., Лабунцов В. А. (главный редактор),  
Ларионов В. П., Лизунов С. Д., Мамиконянц Л. Г., Морозкни В. П., Нетушил А. В., Розанов Ю. К.,  
Пищиков В. И., Семенов В. А., Слежановский О. В., Совалов С. А., Строев В. А., Тареев Б. М.,  
Толстов Ю. Г., Чечурин В. Л., Шакарян Ю. Г., Шаталов А. С., Шилин Н. В.**

**Редакторы по направлениям тематики:**

**Евсеев Б. Н. (электрические машины, электропривод, электрический транспорт); Макаршин Б. Д.  
(ТОЭ, преобразовательная техника, электроматериалы); Прилуцкий А. Л. (электроэнергетика, ТВН,  
электрические аппараты)**

Адреса редакции: 103012 Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 924-24-80  
101000 Москва, Главный почтамт, абонентский ящик № 648. Адрес для телеграмм: МОСКВА, 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО  
Художественный редактор Т. А. Дворецкова Технический редактор Г. В. Преображенская Корректор М. Г. Гулина

Сдано в набор 11.02.92. Подписано в печать 20.03.92. Формат 60×88<sup>1/8</sup>. Вумага кн.-журн. офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 8,82. Усл. кр.-отт. 9,21. Уч.-изд. л. 9,01. Тираж 3547 экз. Заказ 5222. Цена 2 р.

Энергоатомиздат, 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10. Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический  
комбинат Министерства печати и информации Российской Федерации  
142300 г. Чехов Московской области

Отпечатано в Подольском филиале ПО «Периодика», 142110 г. Подольск, ул. Кирова, 25

## СОДЕРЖАНИЕ

Нетушил А. В. Фарадей и проблемы современной теоретической электротехники . . . . .	1
Мигулин В. В. Фарадей и физика . . . . .	5
Баранов М. И. Расчет процесса энерговыделения в цилиндрических токопроводах электрофизических установок высокого напряжения . . . . .	5
Анненков В. З., [Беляков А. П.], Верещинский С. Ю. Зависимость удельного электрического сопротивления грунта от напряженности электрического поля . . . . .	11
Якимец И. В., Наровлянский В. Г., Флейшман Л. С. Индукционные токоограничители с коммутацией магнитного потока . . . . .	17
Мыцык Г. С., Михеев В. В., Фридман П. М. Много-канальное построение преобразователей с промежуточным высокочастотным преобразованием . . . . .	22
Попов В. И. Трехфазно-однофазные обмотки для совмещенных электрических машин . . . . .	32

## СООБЩЕНИЯ

Голованов А. П., Павлова И. В. Оптимизация режимов работы энергосистемы с учетом экологических факторов . . . . .	40
Куренный Э. Г., Дмитриева Е. Н., Чепкасов Ю. И., Пушная И. В. Расчет параметров режима сетей электроснабжения на основе характеристик динамических процессов . . . . .	43
Широков Н. Г., Кутузов С. И. К определению параметров синхронных генераторов малой мощности при частотах высших гармоник . . . . .	46
Казанчян Г. П., Казанчян А. П., Гаспарян М. С., Ликах С. Ф. Расчет оптимального расположения барьеров в высоковольтной полимерной изоляции кабелей . . . . .	49
Казаков О. И. Частотный метод диагностирования электрических цепей . . . . .	51
Фоминых Ю. А., Соковишин Ю. А., Осотов В. Н., Масленников Д. С., Константинов А. Г., Парылис М. Э., Гредитор А. М. Распределение температуры по поверхности прямоугольных шин электрических аппаратов . . . . .	53
Нгуен Тхук Лоан, Нгуен Минь Тuan. Алгоритмы идентификации дискретных динамических систем . . . . .	56
<b>ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА</b> . . . . .	58
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b> . . . . .	60
<b>ХРОНИКА</b> . . . . .	63

## CONTENTS

Netushil A. V.— Faraday and Current Problems in the Theory of Electrical Engineering . . . . .	1
Migulin V. V.— Faraday and Physics . . . . .	5
Baranov M. I.— Calculation of Energy Liberation From Cylindrical Current Carrying Conductors in Electro-Physics Installations . . . . .	6
Annenkov V. Z., [Belyakov A. P.], Vereschinsky S. U.— How the Resistivity of the Earth Depends on the Electric Field Intensity . . . . .	11
Yakimets I. V., Narovlyansky V. G., Fleishman L. S.— Induction Current Limiters Having Magnetic Flux Commutation . . . . .	17
Mytsyk G. S., Mikheyev V. V., Freedman P. M.— Multi-Channel Design of Converters With Intermediate High-Frequency Transformation . . . . .	22
Popov V. I.— Three-Phase/Single-Phase Windings for Aligned Electrical Machines . . . . .	32
<b>REPORTS</b> . . . . .	
Golovanov A. P., Pavlova I. V.— Optimization of Power System Operating Conditions With Account Taken of Ecological Factors . . . . .	40
Kurenny E. G., Dmitrieva E. N., Chepkasov U. I., Pushnaya I. V.— Calculating the Parameters of Supply Network Operating Conditions on the Basis of Dynamic Characteristics . . . . .	43
Shirokov N. G., Kutuzov S. I.— On Finding the Parameters of Small Synchronous Generators at Higher Harmonic Frequencies . . . . .	46
Kazanchian G. P., Kazanchian A. P., Gasparian M. S., Likakh S. F.— Design of the Optimum Arrangement of Barriers in the High Voltage Polymeric Insulation of Cables . . . . .	49
Kazakov O. I.— A Frequency Method for Diagnosis of Electric Circuits . . . . .	51
Fominykh U. A., Sokovishin U. A., Osotov V. N., Maslenников D. S., Konstantinov A. G., Parviliis M. E., Greditor A. M.— Temperature Distribution Over the Surface of Rectangular Busbars in Electrical Apparatus . . . . .	53
Nguen Tkuk Loan, Nguen Min Tuan.— Identification Algorithms in Discrete Dynamic Systems	56
<b>NOTES AND LETTERS</b> . . . . .	
FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING . . . . .	60
CHRONICLE . . . . .	63

## УЧЕБНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ПРОГРЕСС»

**Если у Вас есть деловые партнеры за рубежом или Вы еще только налаживаете контакты с Инофирмами, ищете работу за границей —**

### **ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ «ДЕЛОВОЕ ПИСЬМО НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ» — ЭТО ТО, ЧТО ВАМ СОВЕРШЕННО НЕОБХОДИМО!**

Пособие дает возможность вести деловую переписку с зарубежными партнерами в соответствии с международными стандартами без помощи переводчика.

«Деловое письмо» охватывает весь круг проблем, с которыми сталкивается деловой человек. Это:

- просьба, заказы, запросы;
- требования, претензии и их удовлетворение;
- ответы, подтверждения, отказы;
- кредитные письма;
- реклама и поддержание общественных связей;
- переписка при устройстве на работу;
- официальные поздравления, приглашения, объявления;
- телеграммы и т. д.

Пособие включает в себя более 60 образцов писем и подробнейший комментарий к ним.

Исключительное внимание уделяется этике деловых отношений — поэтому эта книга будет Вашим незаменимым помощником в бизнесе не только за рубежом, но и с фирмами внутри страны.

Исчерпывающая информация и максимум удобств в обращении — и все это за 197 рублей (с учетом 5 % налога). Оплата по наличному и безналичному расчету.

---

**Предварительные заказы принимаются по адресу:**

170002, г. Тверь, пр. Чайковского, д. 21-а, к. 26,  
Тел.: (08222) 3-19-57 УИЦ «ПРОГРЕСС»

170000, р/с № 609090 КБ «Тверьуниверсалбанк» МФО 131010

Предоплата — 100 %

---