

от

ISSN 0013-5380



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1991

•ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ•

10

1991 110-12

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА СССР
ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКОВ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

МОСКВА

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

УДК 621.311.001.83(100)

Сессия Международной конференции по большим электрическим системам высокого напряжения

ДЬЯКОВ А. В., МАМИКОНЯНЦ Л. Г., САВВАИТОВ Д. С.

В Париже с 26 августа по 1 сентября 1990 г. проходила очередная 33-я сессия СИГРЭ. В работе участвовали более 2700 специалистов. Обсуждались 204 представленных доклада.

Генеральная Ассамблея СИГРЭ утвердила новый состав Административного Совета, в который от Советского Союза вошли А. Ф. Дьяков и Д. С. Савваитов; первый из них вошел в состав избранного Административным Советом Исполкома СИГРЭ.

На заседании Административного Совета был выбран новый президент СИГРЭ, г-н Я. Лепецки (Бразилия).

Как и в предыдущие годы, представленные на сессию научно-технические доклады обсуждались на заседаниях 15 дискуссионных групп (ДГ), каждая из которых по номеру, названию и тематике соответствует одному из действующих в СИГРЭ Исследовательских Комитетов (ИК). Кроме раздельных заседаний этих групп, были организованы четыре совместных заседания: «Опыт эксплуатации подстанций и электрической части станций» (ДГ 13 и 23), «Управление реактивной мощностью и напряжением» (ДГ 38 и 39), «Влияние старения на характеристики изоляции» (ДГ 15, 33, 11, 12, 13, 21, 22, 23), «Испытания увлажненной изоляции» (ДГ 15 и 21).

Ниже кратко характеризуется наиболее интересная для широкого круга специалистов информация, нашедшая отражение в докладах и дискуссиях по ним на сессии.

Вопросы вращающихся электрических машин (ДГ 11) охватывали проблемы модернизации, продления срока службы, контроля и диагностики машин, а также создания и использования регу-

лируемого электропровода и пусковых устройств на базе статических тиристорных систем.

В одном из докладов (ФРГ) была подробно рассмотрена методика оценки состояния электрической машины для решения вопроса о ее выводе из работы или реконструкции. Кроме обычно применяемых методов, рекомендуются разработанные в последнее время: инфракрасное сканирование с тепловизором, электромагнитный детектор обнаружения дефектов сердечника статора, анализ отложений на поверхности деталей, ультразвуковой контроль наличия трещин, аналитические методы оценки усталости валопровода по числу циклов нагрузки, по числу пусков и др.

Проведены исследования возможности дальнейшей эксплуатации бандажных колец турбогенераторов, изготовленных из стали 18Mn5Cr, заменяемой в последнее время сталью 18Mn18Cr с высокой стойкостью к коррозии. Опыт работы фирмы Крафтверкунион показал, что бандажные кольца из прежде применявшейся стали могут не заменяться при условии обеспечения отсутствия влаги в машине во время работы и во время остановок.

Рассматривались вопросы контроля крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов и оценки связанных с этими колебаниями усталостных явлений. В частности, описана разработанная в Италии установка для измерения и записи крутильных колебаний. Такими установками будут оснащены все крупные турбогенераторы Италии, они будут связаны с центральной автоматизированной установкой, проводящей анализ усталостных явлений.

Представляет интерес проведенная в Венгрии реконструкция турбогенераторов мощностью 60 МВт с заменой водородного охлаждения на

воздушное с сохранением сердечника и корпуса статора. Там же проводилась реконструкция воздушных турбогенераторов такой же мощности; при этом за счет оптимизации конструкции, включающей усовершенствование транспозиции стержней обмотки статора, увеличения воздушного зазора и других мер, к. п. д. повышен на 0,73 %.

Одним из вариантов использования устаревших турбогенераторов является их переделка в синхронные компенсаторы. Во Франции это осуществлено на двух машинах мощностью по 250 МВт. Такое решение экономичнее приобретения новых синхронных компенсаторов.

Большое внимание было уделено совершенствованию контроля состояния и диагностики генераторов и крупных электродвигателей. Предлагаются различные методы оценки состояния изоляции, описываются новые средства контроля, например, оптический метод определения температуры поверхности ротора в работе, измерения температуры на роторе с помощью радиотелеметрии, использующиеся на канадских турбогенераторах 500 и 540 МВт.

В части создания новых систем частотнорегулируемого электропривода сообщалось, например, о разработанных в Чехо-Словакии двигателях мощностью 25 МВт с частотой вращения 2900—3900 об/мин; два доклада от СССР были посвящены новым разработкам мощного частотнорегулируемого электропривода и тиристорных преобразователей частоты для пуска турбоагрегатов.

На сессию СИГРЭ 1992 г. выбраны следующие предпочтительные темы: разработка и опыт эксплуатации новых видов машин, таких, как частотнорегулируемые электрические машины и асинхронные генераторы; сравнение проектных и эксплуатационных характеристик турбогенераторов мощностью порядка 250 МВ·А с воздушным и водородным охлаждением; продление срока службы турбо- и гидрогенераторов и крупных электродвигателей, включая оценку срока службы; применение новых методов контроля, диагностики и профилактического обслуживания оборудования, возможность повышения мощности и надежности.

По вопросам использования в электроэнергетике сверхпроводимости с активным участием ИК 11 было проведено заседание «круглого стола», на котором заслушаны доклады по отдельным видам оборудования.

Сообщалось о планах ФРГ по созданию прототипа сверхпроводящего (СП) турбогенератора 850 МВ·А в 1995 г., Японии — 70 МВт в 1993 г. и 200 МВт — к 2000 г., о работах фирмы Сименс по высокотемпературным сверхпроводникам (ВТСП), фирмы Альстом—Атлантик по разработкам трехфазного СП-статора турбогенератора.

Разработки ВТСП по разным оценкам позволят повысить к. п. д. генераторов на 0,03—0,2 %, упростить электрическую и тепловую изоляцию, повысить рабочие напряжения, упростить конструкцию ротора, что позволит снизить минимально рентабельную мощность генератора до уровня 300 МВ·А и менее.

Описаны разработки СП-трансформаторов 200 кВ·А, 1 кВ и 500 кВ·А, 5,6 кВ, разработки ВТСП-трансформаторов с охлаждением жидким азотом (предположительный проект трансформатора 400/110 кВ). Масса такого трансформатора мощностью 1000 МВ·А соответствует массе обычного, мощностью 200 МВ·А. Целесообразная минимальная мощность низкотемпературных СП-трансформаторов лежит между 350 и 1000 МВ·А.

Изучается возможность создания СП-индуктивного накопителя на энергии от 1000 до 30000 МВт·ч; демонстрационные проекты выполняются в США и Японии.

СП-ограничители тока сравнительно небольшой мощности выполнены в Великобритании, во Франции, в Голландии.

СП-провода и кабели освоены для переменного тока 50 Гц на основе ниобий-титанового сплава для плотности тока более 2000 А/мм² при 5 Тл и 4,2 К, а также ниобий-оловянного сплава (1000 А/мм² при 14 Тл и 4,2 К).

Продолжаются разработки ВТСП, в том числе для кабельных линий (США, ФРГ и другие страны). В перспективе их применение признается целесообразным в первую очередь для ограничителей аварийных токов, далее — трансформаторов, регуляторов мощности и лишь затем — для СП-генераторов.

Принято решение о создании специального Комитета, координирующего работу ведущих специалистов различных направлений применения СП-устройств по единой программе в рамках СИГРЭ.

По проблемам трансформаторов (ДГ 12) основное внимание уделялось тепловой нагрузочной способности и работе генераторных трансформаторов.

Общий вывод из докладов и дискуссий по первой проблеме — особое внимание должно быть уделено методам определения температуры наиболее нагретых точек (ННТ) и их стандартизации в рамках МЭК, а также влиянию на старение изоляции.

Распространение получают датчики температуры ННТ, подключаемые через оптоволоконные каналы (Великобритания, Финляндия, Франция, США, Япония). Перспективно применение распределенных волоконнооптических датчиков, «вматываемых» в катушку обмотки (Великобритания и Швейцария).

Контроль истинной температуры ННТ показал, что рекомендованный ранее коэффициент перехода от средней температуры обмотки к температуре ННТ должен быть увеличен с 1,1 до 1,3.

Ход дискуссии показал, что измерения температуры ННТ из-за достаточно сложной измерительной аппаратуры найдут применение лишь при заводских испытаниях трансформаторов и при оценке их перегрузочной способности; в эксплуатации же будут использоваться полученные при типовых испытаниях данные, а контроль будет вестись обычными методами. Различие во мнениях вылилось в дискуссии по вопросу о старении изоляции при кратковременных перегрузках, о влиянии на него форсированного охлаждения трансформатора, о допустимых температурах, ко-

торые указывались в пределах от 140 до 180 °С.

Ввиду невозможности отбора проб изоляции и определения их коэффициента деполимеризации во время работы трансформатора, большой интерес представляет определение степени старения целлюлозных материалов по содержанию выделяемых ими газов СО и СО₂ (Япония). Нормативы на выделение этих газов позволяют оценить остаточный срок службы изоляции по отношению к его минимальному значению, определенному в 30 лет.

Другой подход к оценке допустимых нагрузок трансформатора заключается в выявлении образования пузырьков в целлюлозе и масле, окружающих перегретый проводник (США). На температуру образования пузырьков влияет давление в трансформаторе, влагосодержание бумаги. Минимальная температура образования пузырьков при опытах составила 170 °С, при определении же максимально допустимой температуры ННТ множество мнений в процессе дискуссии свелось все же к температуре 140 °С, которая приемлема как по старению изоляции, так и по возникновению пузырьков. Рассматривались также нормы тепловых испытаний — режимы по времени и температуре, применяемые различными энергокомпаниями. Результаты будут учтены при коррекции публикации МЭК 354.

Второе направление докладов по трансформаторам охватывает вопросы создания и эксплуатации крупных генераторных трансформаторов. Рассмотрены их испытания повышенным напряжением, проблемы воздействия на них к. з. В дискуссии выражено общее мнение о необходимости тесного контакта изготовителей и потребителей при создании генераторных трансформаторов.

Было высказано мнение, что для генераторных трансформаторов не надо использовать устройства РПН, ибо они снижают надежность трансформатора; под сомнение поставлена возможность использования генераторных трансформаторов со сниженным уровнем изоляции. Интересно отметить использование при тепловых испытаниях трансформаторов тепловизора, контролирующего нагретые точки на незакрытой баке активной части, при нагрузке током, равным около 0,2 номинального.

Для сессии 1992 г. по трансформаторам определены следующие предпочтительные темы: основные мероприятия по обеспечению работоспособности трансформаторов в эксплуатации (контроль состояния, оценка и продление срока службы, надежность, модернизация и замена); современные требования к испытаниям трансформаторов, их отражение в нормативных документах (испытания импульсами, индуктированным напряжением, акустические исследования, техника измерений и фиксации результатов испытаний); моделирование трансформаторов в части несимметричных режимов работы (в том числе при коммутациях), высокочастотных процессов в трансформаторах при воздействии очень крутых фронтов, а также в отношении тепловых ха-

рактеристик в условиях быстро изменяющейся нагрузки.

Проблемы коммутационной аппаратуры (ДГ 13) рассматривались главным образом в части коммутации емкостных токов, управления моментами коммутации, концепции применения коммутационных аппаратов с учетом прогресса в области техники защитных устройств и коммутации.

Подробно рассматривались вопросы коммутации шунтирующих конденсаторных батарей и фильтров высших гармоник — расчет восстанавливаемых напряжений, оценка отключающей способности выключателей, в частности, с использованием характеристик «холодной» электрической прочности.

На отключение емкостной нагрузки успешно испытан одноразрывный японский элегазовый выключатель на напряжение 550 кВ.

Актуальность проблемы разработки выключателей с управлением моментом коммутации заставила поднять вопрос о создании рабочей группы по этой тематике в ИК 13. Тема обсуждалась очень активно. Отмечены большие возможности таких выключателей по снижению эксплуатационных расходов, уровня изоляции, повышению ресурса выключателей, а главное — снижению вероятности тяжелых аварий в энергосистеме. В первую очередь такие выключатели будут применены для коммутации конденсаторных батарей, включения трансформаторов и реакторов, отключения малых индуктивных токов, отключения генераторов. Большие успехи в создании таких выключателей напряжением до 275 кВ имеют фирмы Японии и ФРГ.

Рассматривалось использование элегазовых выключателей в сложных условиях, например, при наличии разветвленной кабельной сети и при отключении шунтирующего реактора. Обсуждались пути усовершенствования элегазовых выключателей, улучшения приводов выключателей. Обсуждалось также применение ограничителей перенапряжений как альтернатива выключателям с предвключенными резисторами; первый вариант представляется более экономичным.

На сессию 1992 г. предлагается следующая тематика докладов: вопросы надежности силовых выключателей (в том числе профилактическое обслуживание, продление срока службы, повышение отключающей способности, старение выключателей, методы оценки состояния); методы и схемы синтетических испытаний выключателей (пофазные испытания, испытания на коммутацию емкостной нагрузки, испытания КРУ, стандартизация испытаний); работа коммутационной аппаратуры в нормальных и сложных условиях эксплуатации (внешние воздействия со стороны системы, особо высокие и низкие температуры, стандартизация особых условий, вероятность возникновения таких условий).

На заседании ДГ 14 рассматривались как вопросы собственно **передач постоянного тока** (ППТ), так и новых средств регулирования напряжения, ограничения перенапряжений, а

также связи ППТ с системами переменного тока.

На сегодняшний день в мире работает 25 ППТ и 16 ВПТ (вставок постоянного тока), сооружается еще 19 ППТ и ВПТ. Наиболее мощная ППТ — от ГЭС Итайпу, на напряжение ± 600 кВ, 6300 МВт, 783 км, введенная в эксплуатацию в 1988 г. При обсуждении рассматривались вопросы надежности ППТ, требования к испытаниям полупроводниковых вентилей как важнейшей части ППТ, существеннейшим образом влияющей на ее надежность.

Рассматривалась работа вставок постоянного тока Дюрнор, Сидней, Майлз Сити, Макнейл, будущей ВПТ «Вена — Юго-Восток», особенности управления напряжением на них. Обсуждались возможности регулирования напряжения и реактивной мощности непосредственно преобразовательными блоками, как это предложено в докладе от СССР, посвященном Выборгской ВПТ. В дискуссии высказывалось мнение о том, что такое регулирование нецелесообразно в рабочих режимах из-за увеличения содержания высших гармоник. Рассмотрен опыт работы тихоокеанской ППТ-связи в США напряжением 500 кВ, мощностью 3100 МВт (коэффициент вынужденных простоев 0,1 %, готовность — 90 %), особенности связи ППТ Швеция — Готланд, показавшие преимущества биполярной ППТ перед униполярными вариантами.

В докладах, посвященных многоподстанционным ППТ, излагаются возможности их выполнения, в том числе с применением преобразователей с принудительной коммутацией, а также новые концепции применения ППТ, связанные с разработкой многоподстанционных линий. Указывалось, в частности, что варианты передачи 1000 МВт на 770 км с отбором 20 МВт на постоянном и переменном токе экономически эквивалентны. Интересно, что в варианте с постоянным током поддержание напряжения с помощью синхронного компенсатора имеет преимущества по сравнению со статическими компенсаторами. Кстати, было принято решение о создании в ИК 14 рабочей группы по гибким системам переменного тока с использованием управления на мощных тиристорах: фазовращатели, устройства демпфирования качаний, регулирующие устройства продольной компенсации и т. п.

Предпочтительными темами для докладов сессии 1992 г. по ДГ 14 определены: новые технические решения, в том числе управляемые (гибкие) передачи переменного тока; объединение многоподстанционных ППТ с энергосистемами переменного тока, их влияние на последние со слабыми связями.

Проблемы в области **электрической изоляции** обсуждались на двух совместных заседаниях ДГ 15 (изоляционные материалы) и ДГ 21 (кабели) и ДГ 15 и ДГ 33 (перенапряжения и координация изоляции). Представленные доклады и дискуссии были посвящены двум основным темам: различные аспекты испытаний поли-

мерной кабельной изоляции на водный тринг; диагностика различных изоляционных систем.

В докладах по первой группе вопросов подробно охарактеризованы: современные взгляды на механизм водного тринга, влияние тринга на электрические свойства изоляции, ее старение; различные методы испытаний, включая ускоренные методы оценки старения. В частности, отмечается, что росту деревьев тринга могут способствовать механические напряжения. Сушка приводит к частичному или почти полному восстановлению электрических свойств изоляции. Анализ большого числа испытаний, проведенных на различных материалах несколькими методами, указывает на существенное различие результатов, что не позволяет пока давать четкие рекомендации по нормированию испытаний. Нужна дальнейшая работа в этом направлении.

По вопросам диагностики изоляции электрооборудования в числе многих докладов, представленных специалистами из различных стран, следует отметить доклад объединенной рабочей группы 33/15-08. В нем охвачены вопросы старения и диагностики всех основных видов электрооборудования (вращающихся машин, трансформаторов, коммутационной аппаратуры, кабелей и др.). В этом докладе и в ряде других приводятся результаты исследования механизма старения бумажно-масляной изоляции, критерии оценки старения масла и бумаги, влияние теплового износа, возникновение пузырьков, влияние влаги в твердой изоляции (в том числе на скорость старения). Рассмотрены причины повреждений трансформаторов, отмечено, что старение само по себе редко является такой причиной. Классифицированы причины повреждений и методы, выявляющие дефекты с указанием их эффективности. Даны рекомендации по применению отдельных методов, в том числе непрерывного контроля состояния внутренней изоляции оборудования, например, с помощью японской системы непрерывного анализа газов, растворенных в масле. Перспективным направлением исследований является определение содержания фурфурола в масле, позволяющее определить степень старения твердой изоляции без необходимости отбора проб из трансформатора. Участникам технической экскурсии на трансформаторный завод фирмы Альстом было сообщено о проведении работ по освоению такой методики.

Широкое применение для диагностики изоляций различных видов электрооборудования находят методы контроля (непрерывного и периодического) частичных разрядов.

Следует отметить большое внимание, уделяемое в Японии разработке и практическому использованию экспертных систем диагностики изоляции. За два года разработано 10 таких систем, позволяющих оценивать не только состояние, но и остающийся срок жизни изоляции с той точностью, которая доступна специалистам — экспертам. Некоторые из разработан-

ных систем уже использованы для диагностики изоляции более чем 1000 трансформаторов и нескольких сотен электродвигателей.

Заслуживает внимания также сообщение японских специалистов об отсутствии заметного ухудшения характеристик изоляции газонаполненных аппаратов и устройств за 20 лет эксплуатации.

Для ДГ 15 будущей сессии СИГРЭ предложены следующие предпочтительные темы:

электростатические явления в трансформаторах (совместно с ДГ 12), в том числе оценка возможных проявлений электростатики в твердой и жидкой изоляции, минимизация нежелательных эффектов электризации, выявление повреждений, вызванных электростатическими влияниями;

испытания электроизоляционных материалов и кабелей на воздействие влаги (совместно с ДГ 21); диагностика состояния и испытания КРУЭ (совместно с ДГ 23);

межслоевые эффекты в твердых изоляционных системах, в том числе в синтетических изоляторах.

Исследования в области **высоковольтных кабелей** (ДГ 21) освещались главным образом относительно кабелей с экструдированной изоляцией, методов прокладки и монтажа, технического обслуживания и контроля состояния кабельных линий.

Первому из перечисленных вопросов были посвящены основные части представленных докладов и дискуссии.

Доклад от СССР по кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена инициировал дискуссию о воздействии воды на изоляцию и о целесообразности наличия так называемого «эмиссионного экрана». Рассматривались возможности защиты кабеля от воды металлической оболочкой, ламинированной комбинацией из полимера и пленки металла, либо вообще возможности отказа от защиты кабеля от влаги. Опыт эксплуатации показывает, что третья точка зрения также не лишена рациональности. Относительно эффективности «эмиссионного экрана» единой точки зрения достичь не удалось.

Рассматривался также механизм старения полимерной изоляции разных исполнений, а также связанный с этим вопрос о допустимой температуре изоляции. Отмечается общая тенденция к снижению длительно и кратковременно допустимых температур (90 и 130 °С соответственно) для кабелей с полиэтиленовой изоляцией: до 75 и 95 °С во Франции, 80 и 105 °С в Японии.

Сообщалось о положительном опыте эксплуатации кабельных линий с такой изоляцией во Франции на напряжении 220—400 кВ и в Японии — на напряжении 500 кВ.

На сессию 1992 г. для докладов рекомендованы следующие предпочтительные темы: разработка и опыт эксплуатации кабелей с экструдированной изоляцией; состояние и тенденции совершенствования кабельной арматуры; кабельные системы (линии) переменного и постоянного

тока; кабели, включающие волоконно-оптические каналы контроля и передачи данных.

Проблемы **воздушных линий электропередачи** (ДГ 22), обсуждавшиеся на сессии, охватывали расчеты ВЛ на ЭВМ, проблемы срока службы ВЛ, новые решения конструкции опор ВЛ.

Компьютерные программы расчета ВЛ охватывают оптимизацию опор, выбор трассы, планирование обслуживания ВЛ. Эти задачи требуют наличия мощной вычислительной техники.

Обсуждались: опыт широкого применения компьютерных программ для расчетов первой в Индии ВЛ 800 кВ; система автоматизированного проектирования воздушных линий (трассы, опор), разработанная в Финляндии; программы оптимизации расстановки опор ВЛ 400 кВ, разработанная в Испании.

Созданы программы для анализа динамических процессов на ВЛ — воздействия порывов ветра, сброс гололеда, пляска проводов, динамические нагрузки при обрыве провода и т. д. В дискуссии было, однако, отмечено, что часто экспериментальные результаты не совпадают с результатами расчетов.

Актуальнейшими вопросами являются: долговечность ВЛ, их реконструкция, замена отдельных элементов со сниженной надежностью. О методах проверки состояния ВЛ доложила, в частности, энергокомпания Онтарио Хайдро (Канада). Результаты исследований проводов, опор и фундаментов старых линий, о которых сообщали участники дискуссии (СССР, ФРГ, Канада), свидетельствуют о возможности продления срока службы ВЛ до 60 лет, а иногда и до 70 лет при своевременном ремонте и замене ненадежных элементов линий.

Вопросы старения стеклянных изоляторов рассмотрены в докладе от Центрального энергообъединения Великобритании, выявлены слабые места конструкций таких изоляторов.

В Италии проведены исследования усталостных явлений в элементах конструкции ВЛ. В частности, большое внимание уделено этим явлениям в синтетических изоляторах. Предложена эффективная система их испытаний.

В Швейцарии в течение двух лет проводились полевые и лабораторные исследования механических колебаний тросов ВЛ 400 кВ с встроенными волоконно-оптическими системами; установлено, что они слабо влияют на механические и оптические характеристики указанных тросов.

В отношении опор ВЛ значительный интерес представляют: их конструкции для компактных линий 400 кВ в Швеции и 500 кВ в Бразилии; натурные механические испытания опор линии 1000 кВ, проведенные в Японии; результаты расчетов и натурных испытаний прочности опор ВЛ 230 кВ в США.

Предпочтительными темами для будущей сессии являются: нормирование термической стойкости проводов и тросов (при установившихся и изменяющихся тепловых процессах, при КЗ, с учетом метеорологических условий); исполь-

зование ширины коридоров ВЛ (последствия изменений в ограничивающих нормативах, более эффективное использование старых коридоров, методы реконструкции или замены старых ВЛ, обеспечивающие минимумы времени и затрат); диагностика состояния элементов ВЛ (методы диагностики, оценка предшествующих климатических нагрузок, оценка состояния и остающегося срока службы ВЛ).

Доклады и дискуссии **по подстанциям** (ДГ 23) были посвящены вопросам их профилактического обслуживания, компенсирующих устройств, влияния на окружающую среду.

Отмечалось, что для поддержания оборудования подстанций на требуемом уровне работоспособности целесообразен переход от фиксированных межремонтных периодов к ремонту по фактическому состоянию, определяемому на основе контроля в процессе работы. Разрабатываются и применяются, в частности, акустические методы контроля элегазовых подстанций, контроль давления элегаза в корпусе. Особое внимание уделяется надежности элегазовых выключателей. Как показывает статистика, расчетный срок службы современных элегазовых одноступенчатых выключателей составляет около 55 лет, их заменяемые элементы должны выдерживать 45-летний срок службы.

Самым ненадежным элементом силовых выключателей по-прежнему остаются приводы.

При расчетах экономичности интенсификации ухода за подстанциями принималось, что пере-рыв энергоснабжения приносит в промышленно развитых странах ущерб 4,3 долл./кВт·ч или 1,7 долл./кВт.

В докладе от ИК 23 подчеркивалась актуальность широкого применения информационных систем при эксплуатации подстанций.

Обсуждение размещения компенсирующих устройств на подстанции показало, что преимущество имеет подключение компенсаторов на шины высокого напряжения, а не к третичным обмоткам трансформаторов. Снижение потребной для компенсаторов площади может быть достигнуто путем применения новых статических устройств, особенно учитывая перспективу применения запираемых тиристоров, позволяющих отказаться от применяемых ныне больших батарей конденсаторов и шунтирующих реакторов.

Предполагается повсеместное повышение мощности установок для потребления и производства реактивной энергии, например, в Великобритании за последующие десять лет — в шесть раз.

Компактность элегазовых подстанций позволяет выполнять их встроенными в здания, что ставит ряд проблем перед конструкторами по устранению их шума и электромагнитных влияний, исключению пожароопасности. Еще более компактные решения подстанций достигаются путем применения элегазовых трансформаторов, имеющих вес около 95 % и объем 70 % от веса и объема масляного трансформатора той же мощности и обладающий полной пожаробезопасностью (разработки Японии).

Тематика докладов на сессию 1992 г. включает вопросы: надежности подстанций (проектирования подстанции как части энергосистемы или электростанции, проблемы обслуживания подстанции, координация выбора состава оборудования подстанции, особые условия при работе — период реконструкции, работа во время стихийных бедствий и др., положительный эффект от повышения надежности и экономичности подстанций); процедуры приемки подстанций (испытания на месте установки, проверка систем связи, взаимная ответственность изготовителей оборудования, приемщиков и других организаций, особенности приемки новых, реконструированных, расширяемых подстанций), устранение обнаруженных дефектов.

Проблемы **перенапряжений и координации изоляции** (ДГ 33), рассматривавшиеся на сессии, отражали воздействие загрязнения полимерных изоляторов на их характеристики, защиту от перенапряжений ВЛ и подстанций, а также совместно с ДГ 15 вопросы диагностики изоляции трансформаторов и высоковольтной коммутационной аппаратуры.

В разных странах исследовалась деградация поверхности полимерных изоляторов, подробно освещено воздействие морского климата на изоляторы из кремнийорганической резины и этиленпропилендиенмономера. В результате исследований рекомендовано применение кремнийорганической резины.

Доклад рабочей группы 33.10, занимающейся анализом временных перенапряжений и их воздействием на металлооксидные ограничители перенапряжений (ОПН), был посвящен определению резонансных перенапряжений, статистике их появления, рекомендациям по расчету, влиянию на оборудование и ОПН. Вопросам стойкости ОПН по отношению к резонансным перенапряжениям были посвящены и другие доклады. Наибольших успехов в создании ОПН для сетей 550 кВ добилась Япония: у японского ОПН-550 кратность остающегося напряжения на 6—21 % ниже, чем у применяемого в СССР ОПН-500.

Совместной рабочей группой 33/14-05 подготовлено руководство по применению металлооксидных ОПН без искровых промежутков на преобразовательных подстанциях передач и вставок постоянного тока. Рекомендации этого документа проверены на опыте ППТ Итайпу и ВПТ Дюрнрор.

Вопросы **диагностики изоляции**, обсуждавшиеся на совместном заседании ДГ 15 и 33, были охарактеризованы выше.

Предпочтительными темами для докладов на сессии 1992 г. по ДГ 33 названы: испытание и контроль состояния изоляции КРУЭ, включая проблемы координации их изоляции; проектирование и использование металлооксидных разрядников (допустимые термические и электрические нагрузки, возможность поглощения энергии, выбор схемы их присоединения, возможности перевода защищенного ОПН оборудования на повышенное напряжение).

В области **релейных защит** (ДГ 34) доклады и дискуссии были посвящены двум основным темам:

влияние релейных защит и автоматики на надежность энергосистем;

системы релейных защит и автоматики для электрических сетей сложной конфигурации.

Из материалов, относящихся к первой теме, можно отметить анализ и фактические данные о явлениях феррорезонанса в энергосистемах Франции и разработку мероприятий по их предотвращению и средств защиты, если полностью исключить их не представляется возможным. Представляет интерес также разработка цифровой системы защит и противоаварийного управления в энергообъединении Бразилии, имеющей дальние линии передачи.

Во второй группе докладов рассматривались как вопросы построения систем собственно релейной защиты, так и автоматического повторного включения (АПВ) в электрических сетях сложной конфигурации.

Обстоятельно обе эти проблемы рассмотрены в докладе японских специалистов. В нем рассматриваются различные типы защит с передачей информации по ВЧ-каналам на линиях электропередач, микроволновым и опто-волоконным каналам. При этом передаются блокирующие или разрешающие сигналы, отражающие фазы и численные значения электрических величин. В ряде докладов, в том числе из СССР, отмечается высокая эффективность АПВ и указываются особенности их осуществления в сетях сложной конфигурации. В докладе из США описывается методология применения трехфазного АПВ с исключением возможности включения на устойчивое к. з.

Для сессии 1992 г. по ДГ 34 предложены две предпочтительные темы:

вопросы эксплуатации системы защит и автоматики (опыт и тенденции в обслуживании устройств (аппаратов); сбор и анализ фактических данных; опыт и тенденции в проведении испытаний и ремонтов; оценка действий защиты при аномальных и нормальных режимах работы энергосистем);

прогресс в области релейных защит и локальных систем управления (адаптивные системы защит и управления для линий электропередачи; применение экспертных систем в защитах и местном управлении).

Проблемы **связи и телемеханики** (ДГ 35), рассмотренные на сессии, охватывали широкий круг вопросов, относящихся к цифровым системам связи, использованию волоконнооптических линий связи (ВОЛС) в энергетике, развитию радиосвязи, системам телеуправления на основе ЭВМ.

Доклады по цифровым системам связи, обсуждавшиеся на сессии, касались построения и управления цифровых сетей, предназначенных для передачи данных в энергосистемах (Великобритания, Япония и др.), анализа возможных конфигураций сетей связи. Наиболее надежными

для передачи информации являются закольцованные сети, рекомендуется использовать режим пакетной коммутации.

В большинстве высокоразвитых стран в последние годы форсируется переход на цифровые системы: считается, что к 1995 г. 70 % информации будет передаваться по цифровым сетям, а к 2000 г. полностью завершится переход от аналоговой к цифровой передаче данных.

Практика внедрения ВОЛС в энергетику была широко освещена в нескольких докладах. Первое место по их внедрению занимает Япония, на долю которой приходится более 90 % всех ВОЛС в энергетике. Рассматривались как ВОЛС, встроенные в тросы и фазные провода ВЛ, так и волоконнооптические кабели, прокладываемые в земле или подвешиваемые на опорах ВЛ, к тросам или фазным проводам.

В докладах о развитии радиосвязи в энергетике были рассмотрены вопросы ее осуществления как по радиорелейным линиям, так и на УКВ, в том числе с помощью передвижных радиостанций. За рубежом энергосистемы имеют весьма высокую оснащенность УКВ-радиостанциями, в электросетях Японии, Швеции, Ирландии, Бельгии на 100 км сетей напряжением 110 кВ и выше приходится более 60 УКВ-радиостанций (в Советском Союзе — только 7 шт.). Рассмотрено было рациональное использование выделенных радиочастот, организация цифровых систем на базе радиорелейных линий.

Группа докладов по системам телемеханики и дискуссия по ним свидетельствуют о все более широком применении цифровой техники для построения этих систем как при создании новых, так и при реконструкции автоматизированных систем управления различного уровня в энергетике (диспетчерские пункты, подстанции и др.).

Доклады будущей сессии СИГРЭ по ДГ 35 в части связи рекомендовано посвятить: передаче данных по ЛЭП; радиорелейным линиям; ВОЛС; передвижным радиосистемам; проектированию сетей связи; проблеме контроля их работы; специальному математическому обеспечению. В части телеуправления рекомендуются проблемы многоуровневых систем, распределенных систем ЭВМ для диспетчерского управления; вопросы создания и испытания систем телеуправления, передачи данных, включая каналы релейной защиты, повышения ремонтпригодности оборудования и линий передачи данных.

Вопросы **влияния** установок высокого напряжения (ДГ 36) обсуждались в части: исследований полей от электроустановок, их влияния на вычислительную и телевизионную технику и на живые организмы; опасных наводок на цепи связи и протяженные металлические конструкции; влияния ухудшения качества электроэнергии на приемники электропотребителей.

Основное внимание уделялось влияниям магнитных полей, их расчетам, системам защиты от

них, конкретным проявлениям влияния магнитных полей на работу электроустановок, в том числе на дисплей, нормам на допустимые величины магнитных полей.

Влияния на подземные кабели и металлические трубопроводы освещались в докладе от ИК 36, где обобщен международный опыт по ограничению опасного влияния на цепи связи и трубопроводы.

Вопросы качества электроэнергии затрагивали влияния искажения формы кривой напряжения на работу электроприемников, разработку моделей сети для расчета искажений напряжения в ней. На будущее прогнозируется резкое повышение уровня высших гармоник в сетях. Исследовался фликкер в сетях, вызываемый дугowymi печами, рассматривалось применение статических управляемых компенсаторов для подавления фликкера.

На будущую сессию СИГРЭ рекомендуются следующие предпочтительные темы: характеристики и результаты измерений электромагнитных полей электрических силовых установок; средства уменьшения помех от энергосистем и установок потребителя; проблемы электромагнитной совместимости в измерительных, защитных и регулирующих цепях, включая распределенные системы управления.

Планирование и развитие энергосистем (ДГ 37) рассматривалось на сессии в свете взаимодействия электроэнергетики с окружающей средой, вопросов объединения энергокомпаний, планирования и эффективного использования компенсаторов реактивной мощности.

Вопрос о взаимодействии объектов электроэнергетики с окружающей средой был отражен в трех докладах.

В одном из них проанализированы положительные и отрицательные последствия строительства крупных ГЭС в Бразилии и сделан вывод о преобладании первых из них. В другом докладе рассматривались перспективы сооружения ветроэлектростанций в Ирландии; намечается к 2000 г. довести их общую мощность до 420 МВт, что составит около 5 % общей установленной мощности. В докладе от Франции подчеркивается необходимость учета взаимодействия с окружающей средой при выборе типа электростанций (угольных или атомных), площадок для них, а также при выборе трасс линий электропередачи.

По второй группе вопросов следует отметить доклад (ФРГ, Австрия) о пределах объединения энергосистем. Делается вывод о том, что предел объединенных электроэнергетических систем на переменном токе определяется критерием, согласно которому затраты на объединение не должны превышать прибыли, которая может быть получена за счет объединения. Границы объединений могут быть расширены за счет сооружения вставок постоянного тока. В дискуссии по этой группе вопросов определенное внимание было уделено расширению сферы межгосударственного объединения электроэнергетических систем Западной и Восточной Европы.

В материалах по компенсации реактивной мощности большое внимание было уделено оптимизации размещения устройств компенсации, в том числе с учетом динамических процессов в системах.

Для сессии СИГРЭ 1992 г. рекомендованы следующие предпочтительные темы:

влияние на генерирование и передачу электроэнергии конкуренции и координации;

обеспечение покрытия потребности в электроэнергии за пределами 2000 г.;

пути и средства решения проблем все возрастающей необходимости объединения электроэнергетических систем, передачи электроэнергии на дальние расстояния и лучшего использования электрических сетей.

На заседании ДГ 38 «Анализ работы электроэнергетических систем» рассматривались методы оценки надежности и использования математических моделей для ускоренных расчетов в различных аспектах работы таких систем.

Проблемы надежности электроэнергетических систем подробно рассматриваются в СИГРЭ в течение нескольких последних лет. Разрабатываются Руководящие указания по надежности; концепции этого документа обсуждались на заседании Круглого стола в период сессии СИГРЭ 1988 г. в Париже. На сессию 1990 г. был представлен обобщающий доклад, содержащий рекомендации по методам оценки надежности, применяемым в США, Канаде, Италии и других странах. При анализе надежности планируемых энергосистем применяются как детерминированный, так и вероятностный подходы. Первый метод анализа рассматривает отдельные определенные ситуации и получаемые для них устойчивость и стабильность напряжения. Вероятностный метод рассматривает всевозможные ситуации и вероятность их возникновения. Направляющим этапом анализа надежности является эквивалентирование энергосистемы, подход к которому рассматривался в нескольких докладах, так же как и методика сбора и обработки данных по надежности. Дискутировался вопрос о вероятности многократных одновременных повреждений генераторных блоков. Хотя математическое значение такой вероятности очень мало, на практике такие случаи имеют место.

Большой интерес вызвали доклады, содержащие сведения о методах ускоренных расчетов энергосистем на ЭВМ. Такие методы требуются при оценке результирующей надежности, в задачах экономической оптимизации, при расчетах длительных переходных процессов, оценке динамической устойчивости, разработке системных моделей. Весьма распространенной и особо сложной задачей является моделирование энергосистемы в реальном времени. Так, моделирование поведения сети с 50 генераторами с временем разрешения 25 мс требует уже применения параллельных процессоров, а более сложных сетей — супер-ЭВМ и транспьютеров.

Обсуждались аналого-электронные модели энергосистемы, занимающие промежуточное место между электродинамическими моделями и

цифровыми системами. Такие модели представляют большие возможности, чем физическая модель, при сохранении возможностей ускоренного решения, присущих цифровым моделям.

Рекомендованные предпочтительные темы докладов на сессию 1992 г. включают: практическое применение экспертных систем в планировании и эксплуатации энергосистем, методы оценки запасов устойчивости, возможности возникновения коллапса по напряжению и других ограничивающих явлений, методы и средства определения характеристик электропередач и их передающей способности на основе новых концепций потокораспределения, включая регулирующий обмен энергией между электросетями.

Вопросы **управления энергосистемами** (ДГ 39), рассмотренные на сессии, охватывали регулирование реактивной мощности и напряжения, вопросы качества и экономики в эксплуатации энергосистем, работу диспетчера в энергосистеме.

По первому из этих вопросов дискуссия велась на совместном заседании ДГ 38 и 39; по нему было и наибольшее число докладов. Несколько крупных аварий в последние годы показали, что вопросы регулирования напряжения и реактивной мощности в части сильно нагруженных и разветвленных сетей, мощных транзитов энергии, как это имеет место в Европе, требуют своего решения. Отмечалось также, что регулирование напряжения у потребителей с помощью РПН и регулируемых конденсаторных батарей может вызвать снижение качества напряжения в передающих сетях.

Обсуждались технические возможности иерархического регулирования и было отмечено, что постоянные времени должны быть согласованы между энергообъединениями и не должны превышать 10 с для местного регулирования (на электростанциях и в узлах нагрузки), 10 с — 3 мин для регионального (сети СН и ВН) и 5—30 мин для централизованного (в национальных масштабах).

Часть докладов была посвящена оптимизации соотношения таких категорий оценки работы энергосистем, как затраты на эксплуатацию, качество электроэнергии, надежность энергоснабжения и защита окружающей среды. Излагались методы расчета эксплуатационных затрат при заданной надежности с учетом реальных технических возможностей энергосистемы, расчета затрат на очистку выброса электростанции, управления режимом электростанции по минимуму воздействия на окружающую среду.

Повышению возможностей диспетчерского персонала были посвящены доклады о тренажерах. Разработанный в Японии и установленный в диспетчерском управлении тренажер позволяет не только обучать начинающий персонал, но и совершенствовать работу опытных диспетчеров, включая действия в критических ситуациях.

Был также рассмотрен доклад рабочей группы 39.06 на основе результатов проведенного опроса, освещающий как принципы тренажерной подготовки диспетчеров, так и средства и про-

граммы применения тренажеров. Считается, что создание хорошего тренажера равносильно созданию хорошей системы диспетчерского управления, и в этом должны принимать участие специалисты по управлению энергосистемой, по режимам энергосистемы, квалифицированные программисты ЭВМ.

На сессию 1992 г. рекомендуются следующие предпочтительные темы: проблемы устаревания центров управления и их модернизации, проблемы, возникающие при быстром росте энергообмена через межсистемные связи и организация этого энергообмена, проблемы повышения надежности энергосистем и их живучести.

Вне заседаний дискуссионных групп для участников сессии была проведена дискуссия по вопросам применения вычислительной техники в планировании и эксплуатации энергосистем, главным образом, по использованию **экспертных систем** (ЭС).

Ведущий дискуссию отметил, что проблема применения ЭС в электрических сетях может быть сравнима по значимости, например, с атомной энергетикой или системами связи и телеуправления. Применение ЭС особенно эффективно при использовании в работе большого числа данных, при сложных структурах сети, для решения логических задач и задач комбинаторики, при неполной или противоречивой информации.

Отмечены были важнейшие задачи, которые могут быть решены с помощью ЭС:

эффективное осуществление связи «человек — машина»;

уменьшение объема воздействующей на оперативный персонал информации;

поиск повреждений;

автоматизация сложных процессов пуска агрегатов;

поддержка эксплуатационного персонала в сложных ситуациях;

автоматизированное принятие решений;

восстановление работы энергосистемы после аварии;

сброс нагрузки как средство противоаварийной защиты;

планирование развития сети;

тренировка оперативного персонала.

В будущем ЭС станут базами данных, в которых знания экспертов могут собираться много лет и сохраняться в системе, что очень важно для использования знаний высококвалифицированных специалистов энергокомпаний. При правильном использовании ЭС снижается доля операций, проводимых вручную, и повышается тем самым надежность работы энергосистемы.

Требования к ЭС, применяемым в электрических сетях, высоки; для непрерывного действия ЭС надежность ее работы должна быть не ниже, чем для традиционных систем управления. При этом следует учитывать, что результат действия ЭС не является абсолютно точным, так как она опирается на несовершенные до абсолютности, субъективные суждения экспертов.

Экспертные системы нуждаются в непрерыв-

ном уходе, совершенствовании и наполнении базы знаний.

На основании существующих нескольких примеров ЭС ясно, что расходы на реализацию первых проектов ЭС были очень высоки, в частности, из-за того, что отсутствуют четкие правила построения таких систем. По мере накопления опыта в создании таких систем и формирования стандартных подходов можно ожидать снижения стоимости ЭС. Эффективность применяемых ЭС на сегодняшний день вряд ли можно выразить количественно.

Для участников сессии СИГРЭ были организованы технические экскурсии на различные объекты, в том числе:

в исследовательский центр Электрисите де Франс с посещением стендов испытаний кабелей (до 400 кВ) и конденсаторов (до 300 квар в ед.);

на трансформаторный завод фирмы Альстом в Сент-Уане, выпускающий трансформаторы на-

пряжением до 765 кВ с производством порядка 10 ГВ·А в год; в сборке в это время находился, в частности, генераторный трансформатор 750 МВ·А, 525 кВ для Китая; было организовано посещение лаборатории масел, где исследуются, в частности, методы оценки остаточного срока службы трансформаторов, явления статической электризации масла;

на предприятие фирмы Алкатель, являющейся ведущей в мире по производству аналоговой и цифровой аппаратуры радиорелейных линий в диапазоне частот 0,4—22 ГГц с пропускной способностью 0,7—140 Мбит/с;

на подстанцию 400/225 кВ Мезероль, входящую в систему двойного кольца энергоснабжения столицы Франции;

на региональный центр управления Сан Квентин, связанный с национальным диспетчерским пунктом.

Следующая сессия СИГРЭ состоится в Париже с 30 августа по 5 сентября 1992 г.

УДК 621.311-529.072.001.6

Адаптивная централизованная система противоаварийной автоматики

КОЩЕЕВ Л. А., ОКИН А. А., МОШКИН Е. А.

В августе 1989 г. в ОДУ Урала была введена в промышленную эксплуатацию первая адаптивная централизованная система противоаварийной автоматики (АЦСПА) с управляющей ЭВМ (УЭВМ) ЕС-1011 в контуре управления. Этому предшествовала многолетняя работа большого коллектива специалистов в НИИПТ, ОДУ Урала и ряда других организаций, причем был использован опыт разработки и эксплуатации с 1981 г. в том же энергообъединении централизованной системы предыдущего поколения, которую можно условно назвать частично адаптивной [1]. Несмотря на определенную преемственность в общей структуре и использовании некоторых алгоритмических элементов, АЦСПА следует рассматривать как принципиально новую разработку, базирующуюся на иной программно-алгоритмической базе и вычислительной технике. Она обладает качественно новыми возможностями адаптации к текущим схемно-режимным условиям энергосистемы, практически полностью исключая необходимость выполнения трудоемких расчетов вне «реального времени», и обеспечивает необходимую наблюдательность и контроль со стороны диспетчерского персонала.

Основные положения алгоритма АЦСПА. Ниже приводится структура и излагаются основные положения алгоритма, реализованного в АЦСПА ОЭС Урала. Подробное описание отдельных бло-

ков этого алгоритма, а также некоторых его модификаций можно найти в специальном сборнике [2].

Требование адаптивности к схемно-режимным ситуациям направлено на преодоление трудностей, характерных для ранее разрабатывавших систем управления и связанных с большим объемом предварительных расчетов устойчивости; сложностью представления их результатов в форме, необходимой для дозировки управляющих воздействий; снижением точности дозировки, определенной расчетами, выполняемыми на длительный период эксплуатации с большой степенью заблаговременности; возможностью появления непредвиденных (неучтенных в расчетах) аварийных ситуаций.

Технологически задача адаптивного централизованного противоаварийного управления ставится как задача, решаемая в темпе изменения текущего состояния схемы сети и параметров режима, определяемых циклически по телеизмерениям. При этом для условий срабатывания каждого из учитываемых пусковых органов (ПО), с которыми связаны конкретные аварийные возмущения, прогнозируется послеаварийный режим, анализируется устойчивость энергосистемы и определяются место и величина минимально необходимых управляющих воздействий из числа заданных. Эти

результаты запоминаются в устройствах автоматического запоминания дозирровок, и, в случае возникновения соответствующего аварийного сигнала от ПО, воздействия передаются на исполнительные органы АЦСПА. Для повышения быстродействия АЦСПА часть необходимых для выбора управляющих воздействий расчетов проводится по факту изменения схемы сети (схемный цикл), часть — в темпе изменения режима (режимный цикл). Длительность режимного цикла выбирается на основе компромисса между требованиями, диктуемыми, с одной стороны, скоростью изменения параметров режима энергосистемы, а с другой — вычислительными возможностями алгоритма, управляющей ЭВМ и объемом контролируемой сети.

Математические модели энергосистемы в адаптивном алгоритме АЦСПА различны для различных этапов решения задачи: одна — для прогноза послеаварийного режима, другая — для анализа его устойчивости и выбора управляющих воздействий. Обе модели связаны между собой значениями активной мощности в соответствующих элементах.

Модель энергосистемы для прогноза потокораспределения активной мощности в послеаварийном режиме основана на линеаризованных уравнениях изменений установившегося режима в функции от изменений инъекций в узлах схемы с учетом изменения потерь в сети.

Моделью энергосистемы для анализа устойчивости и выбора управляющих воздействий является совокупность узловых моделей, каждая из которых представляет собой консервативную позиционную радиальную модель узла со своими генерацией и потреблением, реальными, отходящими от него линиями электропередачи с эквивалентными синхронными машинами по концам.

Разработанные методы анализа узловых моделей позволяют не только оценивать устойчивость режима, заданного значениями активных мощностей, но и определять предельные значения потоков, пользуясь, как правило, достаточными критериями устойчивости, чем обеспечивается необходимое быстродействие алгоритма.

Блок-схема алгоритма дозирования приведена на рис. 1.

Расчет послеаварийного режима, под которым понимается расчет потокораспределения активной мощности, учитывает информацию о состоянии всех элементов схемы основной сети энергосистемы, и поэтому расчетная схема района управления рассматривается как единое целое.

Требуемое быстродействие достигается путем линеаризации модели энергосистемы, в результате чего возникает возможность отдельного решения уравнений баланса только активных мощностей. Для повышения точности прогноза определяются изменения искомого режима по отклонению к известному исходному режиму.

Линеаризация модели энергосистемы предусматривает линеаризацию как статических харак-

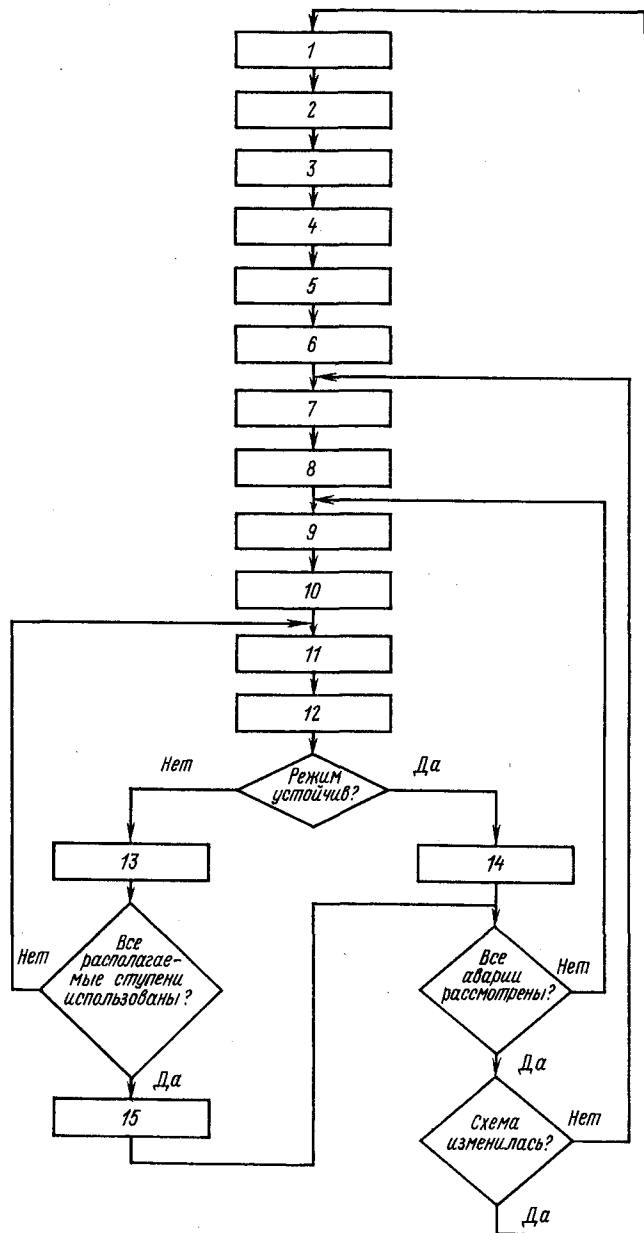


Рис. 1. Блок-схема алгоритма дозирования управляющих воздействий: 1 — ввод информации о текущем состоянии схемы; 2 — расчет проводимостей эквивалентных синхронных машин узловых моделей; 3 — расчет коэффициентов потокораспределения для текущей схемы; 4 — задание очередного расчетного аварийного возмущения; 5 — коррекция проводимостей эквивалентных синхронных машин по аварийным отключениям сети; 6 — коррекция коэффициентов потокораспределения по аварийным отключениям; 7 — ввод параметров текущего режима; 8 — определение э. д. с. узловых моделей; 9 — задание очередной расчетной аварии; 10 — выборка параметров узловых моделей и коэффициентов потокораспределения, соответствующих данной аварии; 11 — расчет послеаварийного потокораспределения, в том числе с учетом управляющих воздействий; 12 — оценка устойчивости послеаварийного режима; 13 — выбор и ввод очередной ступени управления; 14 — запоминание дозирования для данной аварии; 15 — сигнал о необеспечении устойчивости

теристик генерации и потребления по частоте в узлах схемы, так и угловых характеристик мощности ветвей в предположении постоянства модулей узловых напряжений. В результате матема-

тически задача сводится к решению системы линейных уравнений баланса изменений активной мощности в ветвях схемы.

В задаче противоаварийного управления в качестве известного выступает текущий режим, а причины его изменения — это аварийные изменения схемы и режима. При этом искомый режим определяется простым наложением на исходный режим соответствующих расчетных изменений:

$$\left. \begin{aligned} [P_{\max ij}] [\Delta \Psi_1, \dots, \Delta \Psi_i, \dots, \Delta \Psi_j, \dots]^T = \\ = [\Delta P_{g1} - \Delta P_{n1}, \dots, \Delta P_{gi} - \Delta P_{ni}, \dots, \Delta P_{gj} - \\ - \Delta P_{nj}, \dots]^T; \\ P_{ij} = P_{\max ij} (\Delta \Psi_i - \Delta \Psi_j); \\ P_{пар ij} = P_{ij0} + \Delta P_{ij}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $[P_{\max ij}]$ — матрица $(n-1) \times (n-1)$; n — число узлов расчетной схемы; $P_{\max ij} = |U_{iном}| |U_{jном}| \times |k_{trij}(-b_{ij})|$ — элементы матрицы; $|U_{iном}|$, $|U_{jном}|$ — номинальные напряжения в узлах i и j ; $|k_{trij}|$ — модуль коэффициента трансформации; b_{ij} — реактивная проводимость ветви $i-j$; $\Delta \Psi$ — расчетное изменение фазы узловых напряжений; ΔP_g , ΔP_n — аварийные изменения генерации и потребления в узлах схемы; P_{ij0} , $P_{пар ij}$ — загрузка ветви $i-j$ соответственно в исходном и послеаварийном режимах; t — знак транспонирования; ΔP_{ij} — расчетное изменение мощности в ветви $i-j$.

Определение послеаварийного режима сводится к вычислению значений $\Delta P_{gi} - \Delta P_{ni}$ в узлах схе-

мы, а затем к решению системы уравнений (1). При этом правая часть уравнений (1) в линеаризованной форме имеет вид:

$$\Delta P_{gi} - \Delta P_{ni} = \Delta P_{giпер} - \Delta P_{niпер} - \sum_{j \in L_a} (\Delta P_{gjпер} - \Delta P_{njпер}) \frac{P_{gjпар} + P_{njпар}}{\sum_{j \in L_a} (P_{gjпар} - P_{njпар})},$$

где индексом «перв» обозначается первичное изменение генерации и потребления в узле, определяемое аварийным отключением и(или) управляющим воздействием; $P_{gjпар}$, $P_{njпар}$ — послеаварийные значения генерации и нагрузки в узле (без учета изменения частоты); L_a — множество узлов, в которых имеют место аварийные отключения или(и) управляющие воздействия.

Соотношения сумм вида $P_g + P_n$ в этом выражении позволяют учесть удельный вес каждого из узлов по мощности генерации и нагрузки.

Применение двухшаговой итерации на основе (1) позволяет учесть и изменения потерь активной мощности.

Быстродействие и точность оценок устойчивости обеспечивается путем использования методов узлового анализа энергосистем. В отличие от известных РЭН-схем П. Димо, в узловой модели, применяемой в НИИПТ, сохраняются неизменными не только генератор и нагрузка, примыкающие к данному узлу, но и все отходящие от него сетевые элементы. Остальные э. д. с. и проводимости являются неэквивалентными.

Для определения эквивалентных проводимостей используется линейная модель, в которой и генераторы, и нагрузки представляются э. д. с. за реактивностью, а потери не учитываются. При этом вычислительно задача сводится к решению системы линейных уравнений баланса токов в узлах схемы:

$$YU = I,$$

где Y — матрица $(n \times n)$ узловых проводимостей; U — вектор узловых напряжений; I — задающий вектор узловых токов.

Эквивалентные э. д. с. определяются из условия совпадения решений для значений узловых напряжений в узловой модели и в исходной схеме при одном и том же задающем токе (рис. 2).

На рис. 2, а условно показана исходная схема энергосистемы произвольной сложности, где явно представлен один из узлов с номером i , к которому присоединены генератор G_i , нагрузка H_i и k сетевых элементов, примыкающих к остальной энергосистеме в узлах j_1, j_2, \dots, j_k . При этом в виде э. д. с. за реактивностью отображаются не только генераторы, но и нагрузки.

Радиальная модель для узла i должна иметь вид, показанный на рис. 2, б, где G_i , H_i и ветви $i_{j_1}, i_{j_2}, \dots, i_{j_k}$ являются реальными элементами исходной схемы энергосистемы, а $Y_{э.г.j_1}, Y_{э.г.j_2}, \dots, Y_{э.г.j_k}$ — значения проводимости эквивалентных синхронных машин (ЭСМ), которые подлежат определению.

При неизменном составе исходной схемы и любых вариациях режима все элементы эквивалент-

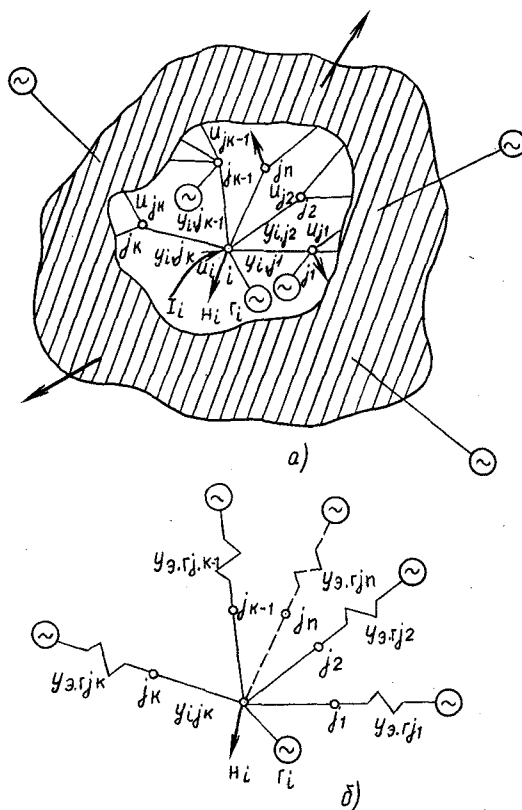


Рис. 2. К методике расчета проводимостей ЭСМ.

ной схемы должны иметь неизменную проводимость, а эквивалентность в каждом режиме обеспечивается соответствующим изменением э. д. с. Это дает возможность произвольно выбрать режим, в котором будет определяться эквивалентная проводимость элементов, в том числе режим с нулевыми значениями э. д. с. ЭСМ и моделей нагрузок. В таком режиме при подаче в узел i тока $I_i=1$ по условию эквивалентности ток в ветвях I_{ijk} и напряжения в узлах $U_i, U_{j1}, \dots, U_{ik}$ в узловой и исходной схемах соответственно равны.

Пренебрегая активным сопротивлением и принимая во внимание, что в данном случае при чисто реактивном сопротивлении можно оперировать модулями векторов тока, напряжения и проводимости, имеем для любой ветви обеих схем $I_{ijk} = (U_i - U_{jk})y_{ijk}$. Так как в узловой бесконтурной модели ток в ветви равен току в проводимости ЭСМ, при замкнутой накоротко э. д. с. для него справедлива запись $I_{ijk} = (U_{jk} - 0)y_{\text{э.к.}jk}$. При совместном решении этих уравнений проводимости ЭСМ узловой модели можно вычислить, определив в исходной схеме напряжения центрального и смежных узлов при задающем токе в центральном узле и замкнутых накоротко э. д. с.:

$$y_{\text{э.к.}jk} = y_{ijk}(U_i/U_{jk} - 1). \quad (2)$$

Для определения искоемых узловых напряжений используется система уравнений баланса токов в узлах расчетной схемы сети. Определение решений и их коррекция производятся известными матричными методами с учетом слабой заполненности матриц.

Эквивалентная э. д. с. в текущем режиме определяется по условиям соответствия текущим значениям напряжения центрального узла и активной и реактивной мощности неперобразуемого элемента.

Эквивалентные э. д. с. в послеаварийном (прогнозируемом) режиме тем же способом непосредственно определены быть не могут.

Для их определения используется следующий прием.

В узловой модели узла l (рис. 3, а) каждый смежный узел (например, узел m), представлен своей узловой моделью (рис. 3, б) с неизменными э. д. с., точки приложения которых как бы отодвинуты от центрального узла на один шаг по графу схемы. При этом появляется возможность приблизительно учесть влияние на э. д. с. схемно-режимных изменений в ближайших к точке приложения э. д. с. элементах сети.

Условия устойчивости режима для консервативной позиционной модели тождественны условиям существования режима, который однозначно задается для узловой модели значениями модулей всех э. д. с. ЭСМ (E_i), в том числе генератора и нагрузки центрального узла, и перетоков активных мощностей по всем лучам (P_i). Поскольку условие баланса активных мощностей выполняется в блоке прогнозирования послеаварийных перетоков, режим N -лучевой узловой модели описывается одним нелинейным уравнением относительно неизвестного значения напряжения U

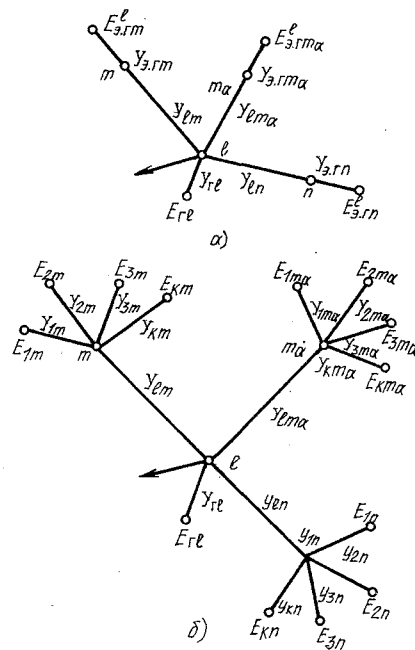


Рис. 3. а — узловая модель; б — преобразование узловых моделей при определении эквивалентных э. д. с.

в центральном узле, полученным из условия баланса реактивной мощности в узле:

$$F(U) = U^2 \sum_{i=1}^N y_i + \sum_{i=1}^N \sqrt{(E_i U y_i)^2 - P_i^2} > 0. \quad (3)$$

Каждое из подкоренных выражений, составляющих вторую сумму функции $F(U)$, обращается в нуль при некотором значении $U_{\text{доп}}$, что соответствует значению угла между векторами U и $E_i \delta_i$, равному 90° . Наибольшее из этих значений ($U_{\text{кр}}$) определяет границу существования функции $F(U)$ слева. Справа граница открыта. Анализ свойств функции $F(U)$ позволил получить достоверное условие существования режима в аналитической форме:

$$F(U_{\text{кр}}) > 0. \quad (4)$$

Кроме того, известна аналитическая форма необходимых условий существования режима в консервативной позиционной модели, которая для узловой модели используется в виде

$$|P_i| \leq P_{i\text{max}} = \frac{E_i y_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \sum_{i=1}^N E_i y_i. \quad (5)$$

Таким образом, только в узкой области режимов, когда выполняются необходимые условия и не выполняется достаточное условие, возможность существования режима определяется по сходности итерационного поиска корня уравнения (3).

Введение дополнительного условия $U_{\text{кр}} \geq U_{\text{min}}$ позволяет идентифицировать как не несуществующие режимы, в которых напряжение в центральном узле уменьшается ниже заданного значения U_{min} .

Известно, что узловая модель, определенная по условию эквивалентности ее режима (исходного

или послеаварийного) режиму в полной схеме, не является в общем случае эквивалентной по условиям устойчивости. Усилия разработчиков были направлены на то, чтобы уменьшить связанную с применением узловой модели погрешность в оценке устойчивости и, что очень важно для противоаварийного управления, обеспечить определенный знак этой погрешности, ведущей к созданию дополнительного запаса. По этой причине применимость алгоритма, разработанного в НИИПТ, по указанным выше условиям тщательно проверялась на различных схемах энергосистем сотрудниками ОДУ Урала, Средней Волги и Северо-Запада, и в настоящее время можно уверенно говорить о перспективности применения разработанных методов для многих схем энергосистем ЕЭС СССР.

Алгоритм выбора и дозировки управляющих воздействий основан на следующих положениях:

управляющие воздействия (УВ) могут быть введены заданными дискретными ступенями в заданных узлах схемы. При этом задачей дозировки является выбор набора наиболее эффективных УВ из заданной совокупности;

выбранный набор УВ должен обеспечить выполнение условия существования режима в каждой из узловых моделей энергосистемы. При линейном прогнозировании послеаварийного режима в пространстве активных мощностей каждому режиму соответствует изображающая точка.

Требование максимального быстродействия алгоритма заставляет отказаться от поиска строго оптимального набора УВ и разбить процесс на последовательные шаги. На каждом шаге поиска происходит выбор наиболее эффективной ступени УВ для текущего положения изображающей точки. Таким образом, предлагаемый метод подобен широко используемому градиентному методу наискорейшего спуска. Определение эффективности каждого из заданной совокупности УВ выполняется следующим образом.

Определяется эффективность УВ для каждой узловой модели из специально формируемого подмножества всех контролируемых. Для этого вводятся вместо активных мощностей новые переменные — коэффициенты загрузки ЭСМ $K_{зар i} = P_i / P_{max i}$. Предельная поверхность в этих координатах вписана в N -мерный единичный куб и близка к сфере. Это позволяет в качестве оптимальной траектории принять движение по направлению, обратному радиус-вектору изображающей точки, а проекцию вектора изменения режима при вводе ступени УВ единичной мощности на оптимальное направление — мерой эффективности по условиям устойчивости. Эта мера для k -й узловой модели на m -м шаге поиска при вводе ступени УВ в j -м узле определяется формулой

$$\Phi_{km}^{(j)} = \frac{1}{R_{m-1}} \sum_{i=1}^N \frac{K_{зар i}^{m-1}}{P_{max i}}, \quad (6)$$

где $R_{m-1} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (K_{зар i}^{m-1})^2}$ — модуль радиус-век-

тора точки, изображающей режим в пространстве коэффициентов загрузки ЭСМ на предыдущем шаге; $K_{зар i}^{(j)}$ — коэффициент потокораспределения на i -й луч от единичной инъекции в j -м узле.

Для оценки эффективности ступени УВ по совокупности влияния на режим всех узловых моделей используется целевая функция:

$$\Psi_i^{(j)} = \alpha_{jm} \left(\sum_k \gamma_{k(m-1)} \Phi_{km}^{(j)} + S_j \right), \quad (7)$$

где $\gamma_{k(m-1)}$ — вычисляемый коэффициент, характеризующий тяжесть режима k -й узловой модели; S_j — штрафная функция, позволяющая «помнить», что управление в данном j -м узле приводит хотя бы в одной узловой модели к ухудшению режима на значение, большее заданного; α_{jm} — весовой коэффициент, задаваемый для данной ступени УВ в j -м узле и позволяющий учитывать технологические и экономические условия при выборе УВ (приоритет использования УВ).

Выполненные расчеты для различных идеализированных и конкретных энергосистем показали возможность использования одних и тех же эмпирических коэффициентов, входящих в целевую функцию, в широком диапазоне схемно-режимных условий.

Разработка эквивалентной схемы. В качестве основной исходной информационной базы АЦСПА, подготавливаемой заранее (вне «реального времени»), выступает эквивалентная схема района управления и смежных энергосистем. При этом должны приниматься во внимание два обстоятельства:

для исключения необходимости частой корректировки эквивалентной схемы в процессе эксплуатации она должна учитывать развитие исходной схемы в соответствии с имеющимися проектными решениями на возможно более отдаленную перспективу;

имея в виду достаточно длительный период работы АЦСПА в отдельных ОЭС без связи их через координирующую систему на уровне ЕЭС СССР, а также необходимость и в последующем работы в подобном режиме (например при отказах координирующей системы), необходимо определять эквивалентные схемы для всех районов управления и обеспечить соответствующий обмен данными для смежных районов.

При определении требований к эквиваленту как района управления, так и смежных с районом управления энергосистем должны учитываться реальные технические возможности наблюдения за состоянием схемы и режимом, а также вычислительные возможности используемой ЭВМ. В любом случае должна быть обеспечена требуемая точность дозирования.

Известно, что точного решения указанной задачи не существует. Обычно для достижения требуемой точности границу области эквивалентирования отодвигают от исследуемого района. Возможности такого приема в данном случае резко ограничены условием наблюдаемости за состоянием оборудования и режимом его загрузки.

Учитывая особенности адаптивного алгоритма дозировки (АДВ), заключающиеся в формировании

нии и использовании упомянутых ранее двух различных моделей энергосистем, требования к методу и алгоритму эквивалентирования могут быть сформулированы следующим образом:

расчеты послеаварийного потокораспределения в полной и эквивалентной схемах должны совпадать;

оценки устойчивости в совокупности узловых моделей, соответствующих непреобразуемой части схемы, в полной и эквивалентной схемах должны совпадать.

При этом вследствие указанных выше особенностей алгоритма АДВ эквиваленты для различных моделей могут быть различными.

Для определения параметров узловых моделей в полной схеме энергосистемы решается система линейных уравнений, составляемых для каждого узла (кроме «земли») в виде узловых уравнений баланса токов с неизвестными узловыми напряжениями. Для прогноза послеаварийного потокораспределения активной мощности решается система линейных уравнений, составляемых для каждого узла (кроме «земли» и балансирующего узла) в виде узловых уравнений баланса изменений активной мощности в ветвях схемы с неизвестными изменениями фаз узловых напряжений. Обе системы уравнений характеризуются симметричной и слабозаполненной матрицей коэффициентов, и порядок их решения обычно диктуется условиями быстройдействия. Но эти же системы уравнений можно решать и в другом порядке: сначала, на первом шаге, решить уравнения для узлов эквивалентируемой части, а затем остальные. Если промежуточный результат решения уравнений для узлов эквивалентируемой части (на первом шаге) запомнить, то он будет представлять собой не что иное, как многоугольник связей между узлами, расположенными на границе между эквивалентируемой и непреобразуемой частями.

В общем случае параметры эквивалентов зависят от режима эквивалентируемой части. Для учета этой зависимости предварительно, вне управляющей ЭВМ АЦСПА, анализируется чувствительность эквивалентов к изменениям схемы и режимов эквивалентируемой части. Как правило, весь диапазон возможных изменений удастся отразить ограниченным числом эквивалентов. Имея в памяти ЭВМ АЦСПА данного района управления указанный набор эквивалентов смежной энергосистемы, по соответствующему сигналу от последней можно выбрать эквивалент, отвечающий текущему состоянию. Таким образом предполагается, например, взаимодействие АЦСПА ОЭС Урала и Средней Волги.

Вопросы взаимодействия и резервирования АЦСПА в общей системе противоаварийного управления ЕЭС СССР. Согласно современным представлениям система противоаварийного управления должна строиться в виде иерархической структуры. При этом описанная выше адаптивная ЦСПА призвана, как правило, выполнять роль устройства среднего уровня с возложенным на нее всей вычислительной работы по определению управляющих воздействий для обеспечения

устойчивости послеаварийных режимов при всех расчетных аварийных возмущениях в пределах ОЭС или значительной ее части.

Нижний уровень может состоять из двух различных типов устройств:

1. Региональные устройства АДВ (адаптивные или неадаптивные), обеспечивающие запоминание дозирровок, вычисленных на верхнем уровне, и реализацию их при возникновении соответствующей аварийной ситуации, решение некоторых самостоятельных задач дозирования, особенно для аварийных ситуаций с ярко выраженной динамикой, а также резервирование АЦСПА верхнего уровня. В зависимости от конкретных условий данной ОЭС, таких устройств может и не быть (как это имеет место в ОЭС Урала). С другой стороны, при наличии в ОЭС значительного количества региональных устройств АДВ роль АЦСПА может свестись в основном к решению задач координации.

2. Локальные устройства, действующие в темпе аварийного процесса. Некоторые из этих устройств действуют совершенно независимо от АЦСПА. Другие могут иметь соответствующий обмен информацией с АЦСПА в виде воздействия на уставки локальных устройств от АЦСПА и (или) передачи информации в АЦСПА от локального устройства при срабатывании последнего, что может быть учтено как часть сложного расчетного возмущения.

В масштабах ЕЭС СССР необходим также самый верхний уровень иерархии, на который должна быть возложена функция координации дозирровок АЦСПА ОЭС по условиям устойчивости межсистемных связей ЕЭС [3]. Принципиально на эту координирующую систему противоаварийного управления (КСПУ) могут быть возложены и функции дозирования некоторых управляющих воздействий, например, управление мощностью межсистемных передач постоянного тока.

Одним из важнейших во взаимодействии устройств различных уровней иерархии является вопрос взаиморезервирования. Опыт эксплуатации в течение 8 лет ЦСПА предыдущего поколения в ОЭС Урала показал, что неготовность системы определяется величиной порядка нескольких процентов, и при этом можно было обойтись без какого-либо автоматического резервирования.

Однако по мере распространения АЦСПА и при создании КСПУ необходимо искать все более общие и всеобъемлющие решения вопросов взаиморезервирования. Одним из основных направлений здесь представляется все большее расширение общей зоны действия устройств смежных уровней иерархии, а это, в свою очередь, достигается повышением интеллекта этих устройств.

Учитывая все это, а также современные тенденции к усложнению схем энергосистем и глубокие сезонные и суточные изменения режима загрузки системообразующей сети, в дальнейшем создание устройств АЦСПА на уровне ОЭС и КСПУ в масштабах ЕЭС реально лишь на основе адаптивных алгоритмов. Региональные устройства АДВ могут иметь как адаптивный, так и неадаптивный алгоритм дозирования. При этом, однако,

следует подчеркнуть, что использование в АЦСПА все более совершенных УЭВМ позволит в дальнейшем отказаться от тех или иных допущений и вместе с тем сократить время режимного цикла расчетов, учесть большее разнообразие аварийных возмущений, более точно отражать динамику, т. е. достигнутый уровень адаптации будет повышаться. Все это указывает на целесообразность развития именно этого направления.

Выводы. 1. Вводом в промышленную эксплуатацию первой адаптивной централизованной системы противоаварийной автоматики, контролирующей всю системообразующую сеть 500 и 220 кВ ОЭС Урала, начат новый этап освоения противоаварийной автоматики с УЭВМ в контуре управления.

2. Созданный на базе оригинальных алгоритмов в НИИПТ комплекс обеспечивает полную адаптацию к изменяющимся в любом диапазоне схемно-режимным условиям в ОЭС при высокой точности дозировки и наблюдаемости решений со стороны диспетчерского персонала. Программное обеспечение допускает дальнейшее развитие и совершенствование отдельных блоков, а также создание на этой базе специализированных программ для использования в диспетчерских и режимных службах в качестве «советчиков» при оперативном управлении, в том числе в «реальном времени».

3. В настоящее время проводятся работы по созданию адаптивных централизованных систем в ряде других ОЭС. Ввод их в эксплуатацию и накопление эксплуатационного опыта первой системы в ОЭС Урала сделает возможным следующий шаг в развитии комплексной автоматизации — создание координирующей системы противоаварийного управления на уровне ЕЭС СССР. Для реализации этой задачи необходимо в самое ближайшее время приступить к практической разработке этой системы, включая вопросы построения всей иерархической структуры, взаимодействия и резервирования на разных уровнях иерархии, определения технических средств передачи и обработки информации, а также алгоритмов и программно-технических средств с учетом прогресса в развитии и распространении вычислительной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошечев Л. А., Садовский Ю. Д. Алгоритм дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики сложных энергосистем. — Электрические станции, 1981, № 9.
2. Автоматическое управление и противоаварийная автоматика в крупных энергообъединениях / И. А. Богомолова, П. Я. Кац, Л. А. Кошечев и др. — В сб. науч. труд. НИИПТ. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е., Окин А. А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. — М.: Энергоатомиздат, 1989.

[15.11.90]

УДК 621.315.052.5.018.782.3.001.24

Математическая модель передачи постоянного тока для расчета электромеханических переходных процессов

ЧЕСАЧЕНКО В. Ф., МАЛЫШЕВ А. В.

Электропередачи постоянного тока (ППТ) применяются для передачи электроэнергии от одной энергосистемы в другую, не связанную с первой линиями переменного тока и имеющей другую частоту (вставки постоянного тока). ППТ включаются также параллельно с межсистемными связями для существенного увеличения пропускной способности связи между энергосистемами, увеличения демпфирования электромеханических колебаний, особенно в слабодемпфированных энергосистемах. Наконец, ППТ благодаря своим свойствам снимают вопрос об ограничении передачи потоков энергии на большие расстояния по условиям устойчивости. Величина передаваемой мощности ограничена только перегрузкой оборудования. Целесообразно применять ППТ в случае равной надежности, меньших капитальных затрат и потерь энергии в сравнении с линией электропередачи переменного тока той же пропускной способности и равного запаса устойчивости примыкающей энергосистемы. ППТ является сложным объектом как в отношении управления, так и в отношении

происходящих в ней электромагнитных процессов. Поэтому в зависимости от рода решаемых задач целесообразно моделировать ППТ по-разному. Модели с пофазным представлением электромагнитных процессов в схемах с вентилями больше применяются для исследования собственно ППТ (более точное внутреннее регулирование, режимы фильтров, последствия нарушения и восстановления зажигания и т. п.). При моделировании энергосистем переменного тока с элементами ППТ для расчета электромеханических процессов выпрямительные и инверторные подстанции достаточно представлять интегральными характеристиками, так как частота колебаний роторов синхронных генераторов не превышает 3 Гц [1]. При разработке таких моделей ППТ учитывают возможности воздействия ППТ на систему переменного тока посредством сигналов регулирования, поступающих из системы переменного тока (внешнее регулирование) [2]. Выпрямительная и инверторная подстанции присоединены к различным узлам энергосистемы переменного тока и соединены ли-

нией постоянного тока с параметрами r, L, C . На обеих подстанциях осуществляется регулирование по току линии¹. Полагаем, что при токе линии больше тока уставки инвертора на инверторе работает только идеальный регулятор, поддерживающий угол погасания инвертора постоянным. На выпрямителе регулятор тока прекращает работу при угле зажигания меньше заданного минимального угла. Преобразователи работают в режиме 2—3, что достаточно для встречающихся нагрузок ППТ при расчетах электромеханических колебаний.

Расчет на ЭВМ переходных электромеханических процессов начинается с расчета установившегося режима энергосистемы. Поэтому сначала целесообразно рассмотреть последовательность такого расчета для энергосистемы переменного тока, имеющей ППТ.

Расчеты установившегося режима энергосистемы с ППТ. На рис. 1 показана расчетная схема ППТ с примыкающими узлами системы переменного тока². Расчет констант установившегося режима основывается на номинальных данных и параметрах ППТ и номинальных напряжениях примыкающих узлов системы переменного тока. К ним относятся:

$u_{d\text{ в.н}}$ — номинальное напряжение ППТ на зажимах выпрямителя;

$P_{d\text{ в.н}}$ — номинальная мощность ППТ на выпрямителе;

$I_{d\text{ н}}$ — номинальный ток ППТ;

$\alpha_{\text{н}}$ — заданный допустимый угол зажигания выпрямителя (номинальный или близкий к нему);

δ_0 — заданный минимально допустимый угол погасания инвертора;

$r_{\text{л}}$ — активное сопротивление линии;

$\cos \varphi_{\text{в.н}} = \cos \varphi_{\text{и.н}}$ — номинальный коэффициент мощности преобразователя;

$x_{\text{к.в}} \%$, $x_{\text{к.и}} \%$ — реактивное сопротивление коммутации, приведенное ко вторичной обмотке трансформатора преобразователя;

$U_{1\text{н}}$, $U_{2\text{н}}$ — номинальные линейные эффективные напряжения в узлах примыкания.

Вычисление констант установившегося режима выполняется по следующим формулам:

$$S_{\text{в.н}} = S_{\text{и.н}} = P_{d\text{ в.н}} / \cos \varphi_{\text{в.н}}; \quad (1)$$

$$a_1 = 3 x_{\text{к.в}} \% \cdot U_{1\text{н}}^2 I_{d\text{ н}} / 100 S_{\text{в.н}}; \quad (2)$$

$$b_1 = 3 \sqrt{2} U_{1\text{н}} \cos \alpha_{\text{н}}; \quad (3)$$

$$c_1 = \pi u_{d\text{ в.н}}; \quad (4)$$

$$k_{\text{т.в.о}} = b_1 / 2a_1 - \sqrt{(b_1 / 2a_1)^2 - c_1 / a_1}; \quad (5)$$

$$a_2 = 3 x_{\text{к.и}} \% U_{2\text{н}} I_{d\text{ н}} / 100 S_{\text{в.н}}; \quad (6)$$

$$b_2 = 3 \sqrt{2} U_{2\text{н}} \cos \delta_0; \quad (7)$$

$$u_{d\text{ и.н}} = u_{d\text{ в.н}} - r_{\text{л}} I_{d\text{ н}}; \quad (8)$$

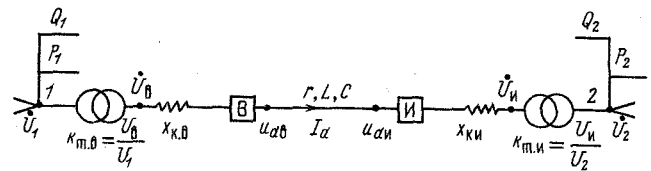


Рис. 1. Расчетная схема присоединения ППТ к энергосистеме

$$c_2 = \pi u_{d\text{ и.н}}; \quad (9)$$

$$k_{\text{т.и}} = b_2 / 2a_2 - \sqrt{(b_2 / 2a_2)^2 - c_2 / a_2}; \quad (10)$$

$$x_{\text{к.в.о}} = x_{\text{к.в}} \% U_{1\text{н}}^2 k_{\text{т.в.о}}^2 / 100 S_{\text{в.н}}; \quad (11)$$

$$x_{\text{к.и}} = x_{\text{к.и}} \% U_{2\text{н}}^2 k_{\text{т.и}}^2 / 100 S_{\text{и.н}}. \quad (12)$$

Расчет установившегося режима ППТ выполняется для заданного перетока мощности на стороне инвертора $P_{d\text{ и.з}}$. Угол зажигания α в процессе расчета должен получиться в заданном интервале (например, $10^\circ - 15^\circ$). Если это не выполняется, то корректируется коэффициент трансформации выпрямителя так, чтобы α получился в середине заданного диапазона. В результате расчета режима ППТ должны быть получены P_1, Q_1, P_2, Q_2 (рис. 1), которые передаются в блок программы расчета режима сети переменного тока. Если модули U_1 и U_2 (рис. 1) поддерживаются неизменными (например, включением источника реактивной мощности ИРМ), то после однократного расчета режима ППТ и сети переменного тока расчет автоматически оканчивается. При нефиксированных U_1 и U_2 после нахождения новых U_1 и U_2 возвращаются вновь к расчету режима ППТ и сети переменного тока. И так до получения заданной точности баланса по активной и реактивной мощности сети, включая узлы примыкания ППТ. Последовательность расчета установившегося режима сети при заданных исходных значениях U_1 и U_2 и констант $k_{\text{т.в.о}}$ и $x_{\text{к.в.о}}$ (которые в процессе расчета могут изменяться) и при неизменных константах, приведенных выше, — следующая:

$$1. U_{\text{и}} = k_{\text{т.и}} U_2$$

$$2. U_{\text{в}} = k_{\text{т.в.о}} U_1$$

$$3. c_{\text{л}} = 3 \sqrt{2} U_{\text{и}} (\cos \delta_0) / \pi; k_p = 3 x_{\text{к.и}} P_{d\text{ и.з}} / \pi; u_{d\text{ и}} = c_{\text{л}} / 2 + \sqrt{(c_{\text{л}} / 2)^2 - k_p} \quad (13)$$

$$4. I_d = P_{d\text{ и.з}} / u_{d\text{ и}}$$

$$5. \cos \varphi_{\text{и}} = \pi u_{d\text{ и}} / 3 \sqrt{2} U_{\text{и}} \quad (14)$$

$$6. Q_2 = -P_{d\text{ и.з}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{и}} \quad (15)$$

$$7. u_{d\text{ в}} = u_{d\text{ и}} + r_{\text{л}} I_d \quad (16)$$

$$8. \cos \alpha = \pi [u_{d\text{ в}} + (3/\pi) x_{\text{к.в}} I_d] / 3 \sqrt{2} U_{\text{в}} \quad (17)$$

9. Если полученное в п. 8 значение $\cos \alpha$ лежит в диапазоне $\cos 10^\circ \geq \cos \alpha \geq \cos 15^\circ$ (здесь указан один из практически возможных диапазонов угла α), то выполняется п. 10. Если нет, то выполняется п. 14.

$$10. \cos \varphi_{\text{в}} = \pi u_{d\text{ в}} / 3 \sqrt{2} U_{\text{в}} \quad (18)$$

$$11. P_1 = P_{d\text{ и.з}} + r_{\text{л}} I_d^2 \quad (19)$$

$$12. Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi_{\text{в}} \quad (20)$$

13. Передаем $P_1, Q_1, P_2 = P_{d\text{ и.з}}, Q_2$ в блок расчета режима сети переменного тока. Выполняем

¹ Авторы приносят благодарность за консультации по работе внутренних регуляторов ППТ Цфасману Г. М. (ВЭИ).

² Компенсирующие устройства, подключенные к третичной обмотке выпрямительного трансформатора или к другому близлежащему узлу системы, учитываются в сети переменного тока.

расчет по этому блоку. Если все небалансы по мощности меньше заданных ε_p и ε_Q , то расчет заканчивается. Если нет, то используем новые рассчитанные напряжения в узлах присоединения ППТ (U_1 и U_2) и возвращаемся к п. 1.

14. Рассчитываем: $\rho = (3\sqrt{2}U_2k_{т.и}\cos\delta_0)/\pi$; $q = r_d - 3x_{к.и}/\pi$; $f = P_{д.и.3}/u_{д.и.}$; $a_3 = 3fx_{к.в}/\pi k_{т.в.}^2$; $b_3 = 3\sqrt{2}U_1(\cos 12,5^\circ)/\pi$; $c_3 = \rho + qf$. Вычисляем новые $k_{т.в.}$ и $x_{к.в.}$:

$$k_{т.в.} = b_3/2a_3 - \sqrt{(b_3/2a_3)^2 - c_3/a_3} \quad (21)$$

и ограничено РПН в пределах $\pm 15\% k_{т.в.0}$;

$$x_{к.в.} = \frac{x_{к.в.0}}{k_{т.в.0}^2} k_{т.в.}^2 \quad (22)$$

Начинаем вычисление по п. 1, пользуясь новыми значениями $k_{т.в.}$ и $x_{к.в.}$. Рассчитанные в установленном режиме векторы напряжений \vec{U}_1 и \vec{U}_2 , потребляемые и генерируемые мощности в узлах примыкания ППТ и другие величины ($P_1, Q_1, P_2, Q_2, I_d, u_{д.в.}, u_{д.и.}$) реж, а также заданные и рассчитанные константы ($k_{т.в.}, k_{т.и.}, x_{к.в.}, x_{к.и.}, \delta_0, r_d$) используются в математической модели динамики ППТ совместно с сугубо динамическими параметрами. Причем параметры исходного режима применяются для расчета начальных условий по уравнениям динамики при производных, равных нулю.

Математическая модель ППТ для расчетов электромеханических процессов энергосистем. ППТ и вставки постоянного тока (ВПТ) при больших возмущениях в энергосистеме воздействуют на энергосистему переменного тока в следующих направлениях. Они принимают на себя избыточные потоки энергии, разгружая передачу или межсистемную связь переменного тока — форсировочный режим ППТ. Быстро реагируют (особенно ВПТ) на отклонения частоты в соединяемых энергосистемах, стремясь изменением перетока мощности поддерживать частоту постоянной. Существенно улучшают демпфирование электромеханических колебаний. Указанные действия осуществляются быстрым воздействием на поток мощности посредством регуляторов преобразователей. Вводятся специальные сигналы управления, которые модулируют основную передаваемую мощность ППТ. Эти сигналы, отражая желаемое воздействие со стороны энергосистемы переменного тока на ППТ, составляют так называемое внешнее регулирование. Конкретный набор сигналов внешнего управления зависит от конкретного места включения ППТ и желаемых функций управления. Причем, по-видимому, функции внешнего управления необходимо наращивать лишь по мере увеличения опыта эксплуатации конкретной ППТ, ограничившись на первом этапе управлением заданного потока мощности. Однако необходимо дать возможность проверять на ЭВМ различные сигналы внешнего управления ППТ при работе в сложной энергосистеме. Поэтому модель предусматривает набор внешних управлений, который частично проверен в условиях зарубежной эксплуатации ППТ [2]. Внутреннее регулирование ППТ, воздействующее на преобразователи, содержит регуляторы минимального и максимального тока линии и идеальный регулятор

угла погасания. Уставки этих регуляторов меняются автоматически в широких, но ограниченных пределах посредством воздействия сигналов внешнего управления. Следует отметить, что форсировочные сигналы внешнего управления, которые должны вызывать соответствующие форсировочные потоки мощности ППТ, не всегда могут быть сполна реализованы из-за возможной посадки напряжения преобразователей на стороне переменного тока. Поэтому при моделировании ППТ для расчетов электромеханических переходных процессов необходимо обязательно включать в модельную схему энергосистемы обычно устанавливаемые управляемые источники реактивной мощности, поддерживающие напряжения преобразователей. В состав сигналов (с коэффициентом усиления) внешнего регулирования входят:

1. $k_{fв}\Delta f_{в} = m_1$ — «мягкое» отклонение частоты, образующееся как разность мгновенной частоты передающей энергосистемы и «запомнившейся» посредством инерционного элемента.

2. $k_{fи}\Delta f_{и} = m_2$ — то же для приемной системы. Эти сигналы сглаживают, но не поддерживают частоту энергосистемы, и, возможно, демпфируют колебания энергосистемы.

3. $-k_{\alpha}\Delta\alpha_{и} = m_3$ — отклонение фазы напряжения инвертора на стороне переменного тока. Сигнал образуется аналогично пп. 1, 2. Осуществляет демпфирование в приемной энергосистеме [2].

4. $k'_l l = m_4$ — сигнал по производной перетока мощности заданной (l, m) линии переменного тока. В основном это линии, присоединенные к тем же узлам, что и ППТ. Предназначается для демпфирования колебаний системы переменного тока. Значение l см. ниже.

5. $k'_{fв}\Delta f'_{в} = m_5$; $k'_{fи}\Delta f'_{и} = m_6$ — производные по отклонению частоты (пп. 1, 2). Возможное применение — стабилизация внешней системы регулирования.

6. $k_s s_{в.в.в.х} = m_7$; $k_{sи} s_{и.в.в.х} = m_8$ — «жесткое» отклонение частоты. Применяется в ВПТ для поддержания частоты в соединяемых энергосистемах посредством регулирования перетока мощности ВПТ вплоть до реверса мощности при критическом превышении частоты одной энергосистемы над частотой другой энергосистемы. Сигналы имеют зону нечувствительности.

7. $k_p(|P_{ик\text{ в.в.х}}| - P_{ик\text{ п.а}})/u_{д\text{ в.в.х}} = m_9$ — сигнал превышения перетока мощности по линии (i, k) над уставкой $P_{ик\text{ п.а}}$. Применяется в противоаварийной автоматике для быстрой разгрузки линии переменного тока набросом мощности на ППТ. При $|P_{ик\text{ в.в.х}}| < P_{ик\text{ п.а}}$ будет $k_p = 0$; при $|P_{ик\text{ в.в.х}}| > P_{ик\text{ п.а}}$ имеем $k_p = 1$.

8. $[k_{о.п.}(|P_{ик\text{ в.в.х}}| - P_{ик\text{ о.п}})dt]/u_{д\text{ в.в.х}} = m_{10}$ — то же, что в п. 7, по интегральному закону. Применяется как средство ограничения перетока по линии переменного тока при медленных изменениях режима в системе (предложение Энергосеть-проекта). Необходимо учесть следующие свойства этого сигнала. Отсутствие сигнала до первого превышения $|P_{ик\text{ в.в.х}}|$ над уставкой $P_{ик\text{ о.п.}}$. При превышении перетока над уставкой $k_{о.п.} = k_{о.п.1}$. При превышении уставки над перетоками $k_{о.п.} = k_{о.п.2}$, при-

чем $k_{o,пл} > k_{o,п2}$. Чтобы отстроить действия сигналов по пп. 7 и 8, принимают $P_{ik,п.а} > P_{ik,о.п.}$.

Помимо указанных выше параметров, в модели динамики ППТ имеются:

L, C — индуктивность и емкость ППТ, имитирующие две монополярные линии;

k_v — коэффициент усиления регулятора максимального тока линии (безынерционная часть);

$k_{v,ин}$ — то же (инерционная часть);

k_n — коэффициент усиления регулятора минимального тока линии (инерционный сигнал);

β_{max} — ограничивает угол опережения сверху (50° — 60°); α_0, α_{max} — минимальный и максимальный углы зажигания (интервал действия регулятора максимального тока);

I_{min} — ограничивает уставку регулятора тока снизу;

I_{max} — ограничивает уставку сверху;

$I_{d,н} \delta_l$ — разность уставок регуляторов тока, причем $\delta_l I_{d,н} < I_{min}$;

$T_{изм}$ — постоянная времени измерительных устройств некоторых сигналов для внешнего регулирования;

T_d — постоянная времени дифференцирующего звена;

T_Δ — постоянная времени фильтрации постоянной составляющей;

T_c — постоянная времени эквивалентной линии, примыкающей к ППТ, примерно равна 0,02—0,04 с [3];

T_v — постоянная времени регулятора тока выпрямителя;

T_n — постоянная времени регулятора тока инвертора;

T_z — задаваемая постоянная времени изменения уставки мощности ППТ;

$k_{опр}$ — определяет критическое напряжение переменного тока опрокидывания инвертора ($k_{опр} U_{2н}$);

$N_l - N_m$ — пара узлов линии, сигнал перетока P_{lm} которой используется для демпфирования;

$N_l - N_k$ — пара узлов линии, сигнал перетока P_{ik} которой используется для разгрузки линии ik переброской части мощности на ППТ.

Уравнения динамики ППТ, разрешенные относительно производных, и алгебраические выражения, входящие в их правые части, имеют следующий вид. Измеряемые сигналы для управления (скольжения векторов напряжения s_v и s_n ; $s = (\alpha_n - \alpha_{n-1}) / h\omega_0$, фазовый угол напряжения инвертора $\alpha_2 = \alpha_n$, перетоки мощности по линиям) проходят через инерционные звенья с постоянной времени $T_{изм}$:

$$\frac{dy_{вых}}{dt} = (x_{вых} - y_{вых}) / T_{изм} \begin{cases} x_{вых} = s_v, s_n, \alpha_2, P_{lm}, P_{ik}; \\ y_{вых} = s_{вых}, s_{н,вых}, \alpha_{вых}, P_{lm,вых}, P_{ik,вых}. \end{cases} \quad (23)$$

После выхода из измерительного звена часть указанных сигналов проходит фильтрацию постоянной составляющей:

$$\frac{dy}{dt} = x_{вых} - y / T_\Delta = \Delta_{вых} \begin{cases} x_{вых} = s_{v,вых}, s_{н,вых}, \alpha_{вых}; \\ \Delta_{вых} = \Delta f_v, \Delta f_n, \Delta \alpha_n. \end{cases} \quad (24)$$

Часть проходит звено дифференцирования:

$$\frac{dy}{dt} = x_{вых} - y / T_{диф} = z'_{вых} \begin{cases} x_{вых} = \Delta f_v, \Delta f_n, P_{lm,вых}; \\ z'_{вых} = \Delta f'_v, \Delta f'_n, l. \end{cases} \quad (25)$$

Из выходных сигналов измерительных, дифференцирующих и фильтрующих звеньев формируется сигнал модуляции $\Delta I_{мод}$ тока уставки регулятора тока $I_{y,v}$ выпрямителя. Вторая составляющая уставки определяется заданной передаваемой мощностью ППТ $P_{d,v,z}$. Изменение во времени с одного уровня на другой происходит по экспоненте с заданной постоянной времени T_z :

$$dP_{d,v}/dt = (P_{d,v,z,нов} - P_{d,v}) / T_z. \quad (26)$$

Модульная часть уставки является внешним законом регулирования (см. вышеприведенные составляющие):

$$\Delta I_{мод} = \sum_1^{10} m_i. \quad (27)$$

Уставка регулятора тока (РТ) на выпрямителе:

$$I_{y,v} = P_{dv} / u_{dv,вых} + \Delta I_{мод}, I_{min} \leq I_{y,v} \leq I_{max}.$$

Уставка регулятора минимального тока (РМТ) на инверторе:

$$I_{y,n} = I_{y,v} - \delta_l I_{d,n}.$$

Сигнал отклонения от уставки РТ:

$$\Delta I_{d,v} = I_{d,v} - I_{y,v}.$$

Сигнал отклонения от уставки РМТ:

$$\Delta I_{n,вых} = I_{y,n} - I_{d,n}, \text{ причем } \Delta I_{n,вых} = 0 \text{ при } I_{d,n} \geq I_{y,n}.$$

РТ имеет две слагаемые сигнала по отклонению — инерционную и безынерционную. Инерционная слагаемая определяется уравнением

$$d\Delta I_{dv,ин}/dt = (\Delta I_{d,v} - \Delta I_{dv,ин}) / T_v. \quad (28)$$

РМТ имеет только инерционный сигнал по отклонению, определяющийся уравнением

$$d\Delta I_{n}/dt = (\Delta I_{n,вых} - \Delta I_{n}) / T_n. \quad (29)$$

Таким образом, внутренние законы регулирования РТ и РМТ будут иметь вид:

$$\alpha = \alpha_{реж} + k_v \Delta I_{d,v} + k_{v,ин} \Delta I_{dv,ин}, \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_{max}; \quad (30)$$

$$\beta = \beta_0 + k_n \Delta I_{n}. \quad (31)$$

При переходных процессах в энергосистеме изменяется ток ППТ. При этом РТ или находится в зоне или выходит на границы регулирования. Несколько сложнее на стороне инвертора. При колебаниях тока ППТ работает или РМТ в ограниченной зоне или регулятор минимального угла погасания (в данном случае идеальный регулятор, поддерживающий $\delta_0 = \text{const}$). Поэтому инвертор представлен двумя внешними характеристиками. В работе находится одна из них — в зависимости от тока инвертора. Упрощенно учтена также возможность опрокидывания инвертора при напряжении ниже критического. Учитывая сказанное, вычисление напряжений на преобразователях u_{dv} и u_{dn} ведется по нижеприведенным соотношениям, чтобы затем рассчитать коэффициенты мощности

и правые части дифференциальных уравнений собственно ППТ.

Вычисляем u_{dv} по формуле для внешней характеристики выпрямителя

$$u_{dv} = (3\sqrt{2} U_1 k_{т.в} \cos \alpha - 3x_{к.в} I_{dv}) / \pi,$$

где $U_1 = \sqrt{U_1'^2 + U_1''^2}$.

Затем вычисляем

$$\cos \varphi_v = \pi u_{dv} / 3\sqrt{2} k_{т.в} U_1.$$

Измеренное выпрямленное напряжение для расчета уставки получаем из дифференциального уравнения:

$$du_{dv, \text{вых}} / dt = (u_{dv} - u_{dv, \text{вых}}) / T_{изм}.$$

При первом расчете правых частей на шаге интегрирования, используя действительные интегрируемые переменные, выполняют следующий анализ:

$$u_{dн} = (3\sqrt{2} U_2 k_{т.н} \cos \delta_0 - 3x_{к.н} I_{dн}) / \pi; \quad (I)$$

$$u_{dн} = (3\sqrt{2} U_2 k_{т.н} \cos \beta + 3x_{к.н} I_{dн}) / \pi; \quad (II)$$

$$u_{dн} = 0,01 u_{dн}. \quad (III)$$

1. Если $U_2 \leq k_{опр} U_{2н}$, то вычисляют $u_{dн}$ по III. Если $U_2 > k_{опр} U_{2н}$, то переходим к п. 2.

2. Если $I_{dн} > I_{у.н}$, то $u_{dн}$ вычисляют по (I)

3. Если $I_{dн} < I_{у.н}$, то $u_{dн}$ вычисляют по (II).

Затем вычисляем

$$\cos \varphi_n = \pi u_{dн} / 3\sqrt{2} k_{т.н} U_2.$$

Дифференциальные уравнения ППТ для Т-образной схемы следующие:

$$dI_{dv} / dt = 2(u_{dv} - u_c - r_{л} I_{dv} / 2) / L; \quad (32)$$

$$dI_{дн} / dt = 2(u_c - u_{дн} - r_{л} I_{дн} / 2) / L; \quad (33)$$

$$du_c / dt = (I_{dv} - I_{дн}) / C. \quad (34)$$

Без учета емкости, что для расчета динамической устойчивости приемлемо, имеем везде $I_{dv} = I_{дн} = I_d$, и

$$dI_d / dt = (u_{dv} - u_{дн} - r_{л}) / L. \quad (35)$$

Считая, что выпрямительный узел — нагрузочный, а инверторный — генераторный, и с учетом направлений потоков мощности (рис. 1):

$$P_1 = u_{dv} I_{dv}; \quad Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi_v; \quad P_2 = u_{дн} I_{дн}; \\ Q_2 = -P_2 \operatorname{tg} \varphi_n. \quad (36)$$

Примыкающие к ППТ линии переменного тока могут быть представлены с каждой стороны ППТ некоторой эквивалентной линией (i, k) с параметрами x_3, r_3 [3]. Если в паре полных уравнений (в синхронных координатах d_s, q_s) этой линии, которые имеют для свободной составляющей процесса комплексный корень $-r_3/x_3 \pm j1$, освободиться от мнимой части корня $\pm j1$ посредством замены точных членов $(U_i' - U_k' + x_3 I_{qs})/r_3$, $(U_i'' - U_k'' - x_3 I_{ds})/r_3$ приближенными (с точки зрения электромагнитных процессов) значениями составляющих тока I_{ds}^*, I_{qs}^* , полученных из известных соотношений сети для медленно меняющихся режимов, то уравнения токов будут иметь вид $(x_3/r_3) dI/dt + I = I^*$. Это уравнение отражает баланс установившегося режима ($I = I^*$), дает воз-

можность переменные узловые токи I , входящие в столбовую матрицу узловых токов (в уравнении сети $UY = I^0$), представить как интегрируемые переменные, что отвечает требованию безытеративности в процессе интегрирования алгебро-дифференциальной системы уравнений [4]. Причем в момент коммутации этот ток не претерпевает скачка, после быстрого затухания свободной составляющей при электромагнитических колебаниях ток I будет незначительно отставать от безынерционного тока I^* . Безытеративное решение алгебро-дифференциальной системы уравнений динамики позволяет избежать проблемы, которая возникает при итеративном решении системы алгебраических уравнений, когда переключение работы с одного регулятора на другой в ППТ может приводить к несходимости итерационного процесса [5, 6].

Совместно с (36) безынерционные узловые токи сети I^* для узлов присоединения «1» и «2» (рис. 1) будут равны:

$$I_{ds1}^* = (P_1 U_1' + Q_1 U_1'') / U_1^2; \quad I_{qs1}^* = (P_1 U_1'' - Q_1 U_1') / U_1^2;$$

$$I_{ds2}^* = (P_2 U_2' + Q_2 U_2'') / U_2^2; \quad I_{qs2}^* = (P_2 U_2'' - Q_2 U_2') / U_2^2.$$

Уравнения узловых токов с учетом инерционности эквивалентной примыкающей к ППТ линии переменного тока будут иметь вид:

$$dI_{ds1} / dt = (I_{ds1}^* - I_{ds1}) / T_c; \quad (37)$$

$$dI_{qs1} / dt = (I_{qs1}^* - I_{qs1}) / T_c; \quad (38)$$

$$dI_{ds2} / dt = (I_{ds2}^* - I_{ds2}) / T_c; \quad (39)$$

$$dI_{qs2} / dt = (I_{qs2}^* - I_{qs2}) / T_c. \quad (40)$$

Элементы матрицы I^0 узловых токов [4] присоединения ППТ, в которых также могут быть синхронные генераторы (компенсаторы) и нагрузки, будет иметь вид:

для выпрямительной подстанции —

$$I_1^0 = I_{r1} - (I_{ds1} + jI_{qs1}) - I_{nr2}; \quad (41)$$

для инверторной подстанции —

$$I_2^0 = I_{r2} + (I_{ds2} + jI_{qs2}) - I_{nr2}. \quad (42)$$

Таким образом, система уравнений с входящими в нее соотношениями (23) — (42) моделирует переходные процессы ППТ в составе электроэнергетической системы.

Программа для ЭВМ, некоторые результаты расчета. По приведенным выше алгоритмам расчета установившегося режима и переходного процесса ППТ в составе энергосистемы переменного тока была разработана программа расчета электромагнитических переходных процессов и динамической устойчивости энергосистем, содержащих практически любое число отдельных ППТ и ВПТ, присоединенных по схеме рис. 1. Программа включена в комплексную программу расчета переходных процессов и устойчивости Д-88, разработанную в ЭНИН для ЭВМ серии ЕС.

На рис. 2—4 представлены некоторые результаты расчетов переходных процессов по этой программе. Расчетная схема энергосистемы —

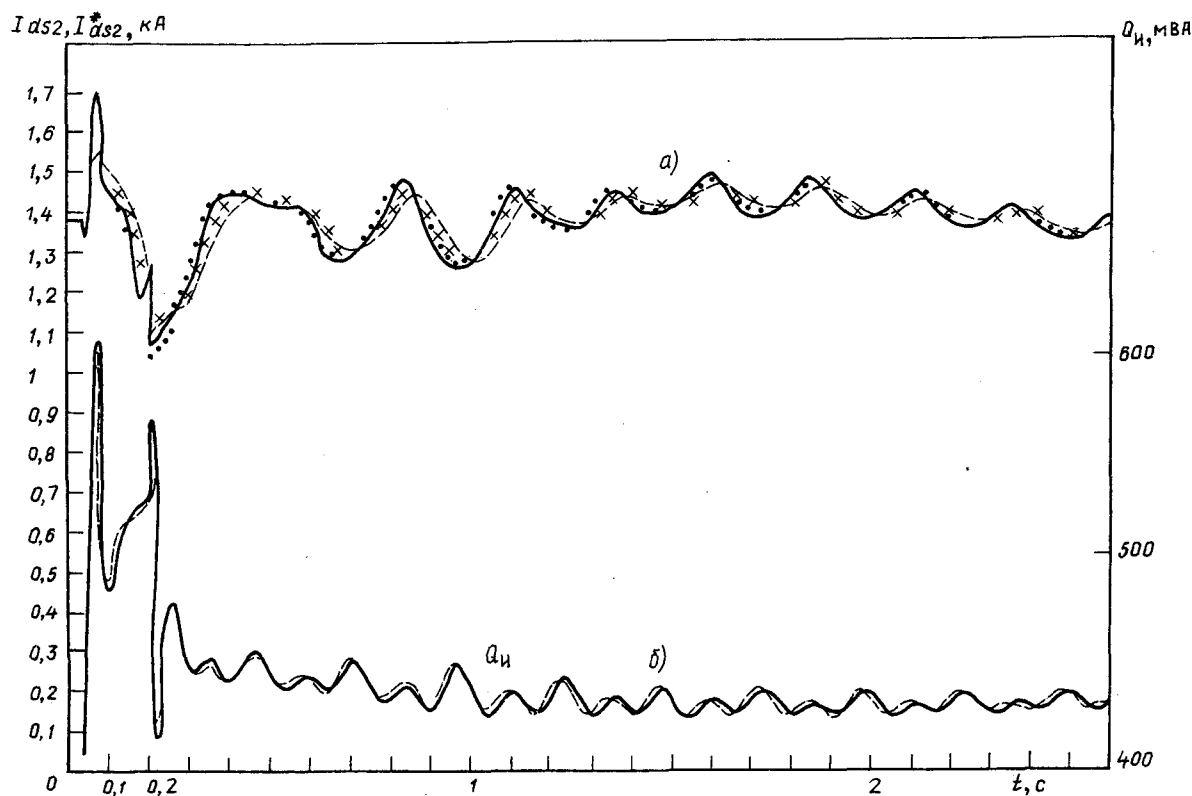


Рис. 2. а — зависимость от времени узлового тока $I^*(P, Q, U)$ и узлового тока I , учитывающего инерционность T_c (— ток I_{ds2} ; --- ток I_{ds2} при $h=0,01$ с, $T_c=0,04$ с; ... ток I_{ds2}^* ; xxx — ток I_{ds2} при $h=0,005$ с, $T_c=0,02$ с); б — зависимость реактивной мощности Q_n от времени (— Q_n при $h=0,01$ с, $T_c=0,04$ с; — Q_n при $h=0,005$ с, $T_c=0,02$ с)

33 узла, 45 ветвей. На рис. 2, а показано различие между одной из составляющих переменного тока в синхронных осях ($d_s q_s$), вычисленных по соотношениям квазиустановившегося режима, и током, когда учитывается инерционность эквивалентной линии, примыкающей к ППТ. Как видно, различие между токами — эффект запаздывания — уменьшается с уменьшением T_c . Из рис. 2, б следует, что в рассматриваемом диапазоне $T_c=0,02 \div 0,04$ с получаются для мощностей результаты, практически мало отличающиеся в переходном процессе, а интегрирование проходит при указанных шагах h устойчиво. Следует отметить, что электромеханические колебания в рассматриваемой схеме имеют сравнительно высокую частоту (P_r колеблется с частотой 4 Гц), что увеличивает сдвиг токов I и I^* и мощности Q_n на рис. 2 (соответственно а и б).

На рис. 3 показан переходный процесс при коротком замыкании в энергосистеме. Как видно из рис. 3, увеличение коэффициентов РТ k_v и $k_{v,ин}$ повышает качество регулирования потока мощности через ППТ, так как несмотря на существенные возмущения $P_r(t)$ в системе переменного тока, мощность P_v'' имеет значительно меньшие колебания за счет интенсивного регулирования посредством угла α . Уменьшение этих коэффициентов приводит (относительно предыдущего случая) к существенному увеличению колебаний мощности ППТ (P_v'). Однако меньшие значения коэффициентов также приемлемы, так как по отношению

к полной мощности P_v размах колебаний P_v' практически невелик.

На рис. 4 показан процесс наброса мощности ППТ от $P_v=871$ МВт до $P_v=1000$ МВт. Процесс наброса происходит по экспоненте с заданной постоянной времени $T_z=0,3$ с. Наброс практически заканчивается за 3 с, так как ток I_d , полученный на ЭВМ, и ток, рассчитанный по (35) при $dI_d/dt=0$, совпадают. Интегрирование системы уравнений (23)—(42) происходит устойчиво и с нормальной точностью. Преобразовательные подстанции выходят на уровень большего потребления реактивной мощности. Выпрямленные напряжения снижаются, но образуют большую разность, чем до наброса мощности, за счет чего и возрастает ток ППТ. Напряжения переменного тока на подстанциях также снижаются при набросе мощности, но в меньшей степени, так как поддерживаются на выпрямителе близко расположенной станцией, а на инверторной стороне — синхронным компенсатором.

Выводы. Приведенные алгоритмы реализованы в программе Д-88, разработанной в ЭНИН, что дает возможность проводить промышленные и проектные расчеты электромеханических процессов в энергосистемах при наличии ППТ и ВПТ. Разработанная методика получения безытеративного алгоритма может быть применена и при моделировании других нелинейных объектов энергосистем (ИРМ, индуктивных накопителей и др.).

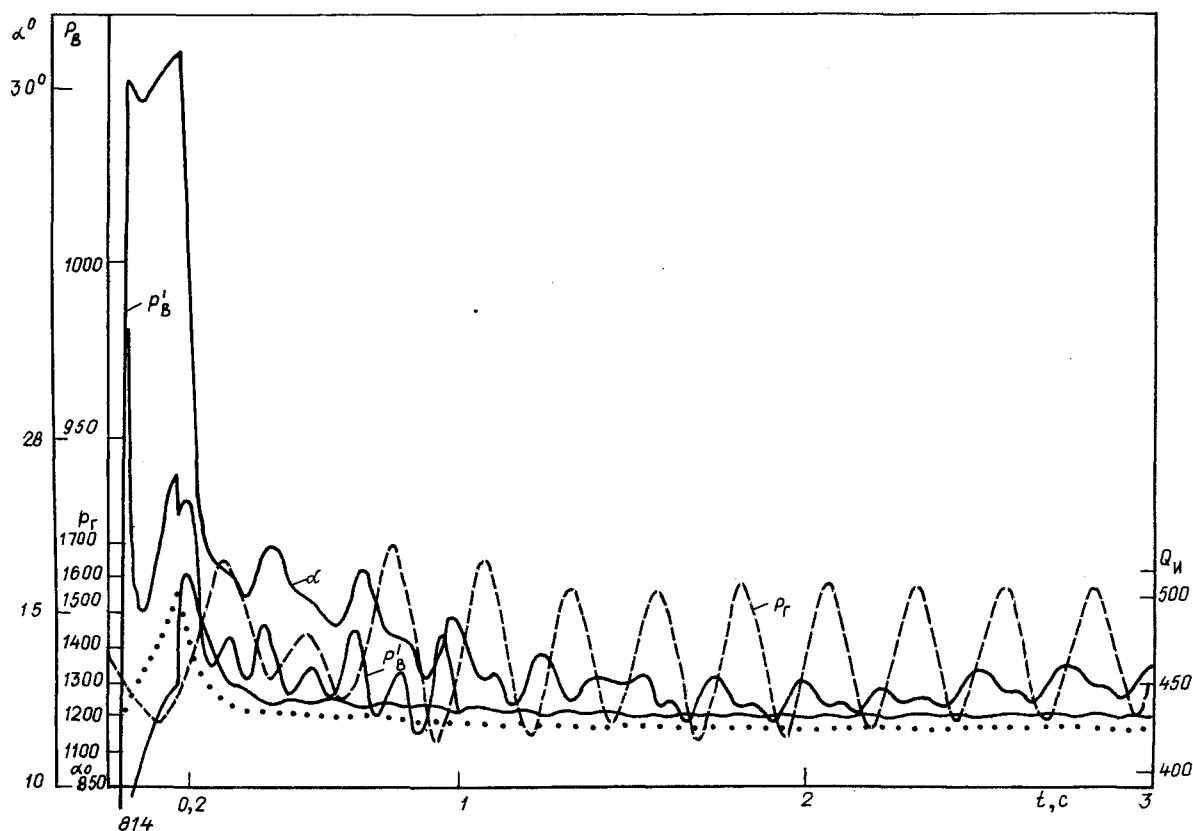


Рис. 3. Переходный процесс в энергосистеме, содержащей ППТ, при коротком замыкании (от 0,04 до 0,2 с) в районе инвертной подстанции: P_r — электромагнитная мощность эквивалентного генератора на стороне выпрямительной подстанции, работающего на несколько направлений; P'_B , Q_u — активная мощность на выпрямителе и потребляемая реактивная мощность на инверторе при $k_B=1,2$, $k_{B,ин}=16$, $T_B=0,1$ с, $k_u=0,4$, $T_u=0,03$; P'_B — активная мощность на выпрямителе при $k_B=0,4$, $k_{B,ин}=4$; α — угол зажигания выпрямителя при $k_B=1,2$, $k_{B,ин}=16$

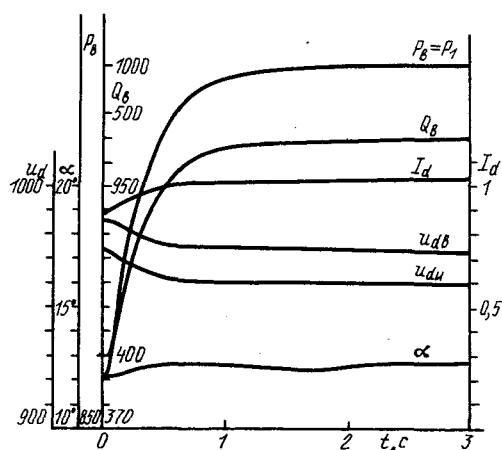


Рис. 4. Переходный процесс в ППТ при набросе передаваемой мощности на выпрямителе путем изменения уставки РТ через инерционное звено с постоянной времени $T_s=0,3$ с

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электропередача постоянного тока как элемент энергетических систем / Л. Р. Нейман, С. Р. Глинтерник, А. В. Емельянов, В. Г. Новицкий. — М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1962.
2. Энергетика за рубежом. Передача энергии постоянным током высокого напряжения / Под ред. В. В. Худякова. — М.: Энергия, 1978.
3. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.: Энергия, 1964.
4. Жидких Н. М., Чесаченко В. Ф. Безытеративный алгоритм расчета динамической устойчивости электроэнергетических систем. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1970, № 3.
5. Андреюк В. А., Шлайфштейн В. А. Метод расчета электромагнитных переходных процессов в энергосистеме, содержащей передачу постоянного тока. — В сб.: Передача энергии постоянным и переменным током / Тр. НИИПТ, 1977, вып. 26.
6. Учет вставки и многоподстанционных электропередач постоянного тока в расчетах установившихся и переходных электромагнитных режимов энергосистем. Совместная работа мощных преобразователей и энергосистем / В. П. Иванов, Л. А. Кошечев, А. В. Черкасский, В. А. Шлайфштейн. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.

[23.10.90]

Проблемы надежности и механики воздушных линий электропередачи¹

КЕСЕЛЬМАН Л. М., доктор техн. наук

Среднеазиатское отделение института «Энергосетьпроект»

Традиционные подходы к проектированию и эксплуатации воздушных линий электропередачи (ВЛ) основаны на детерминистских принципах работы и расчета элементов ВЛ. Основное содержание этих принципов можно выразить следующими положениями:

1. ВЛ состоит из отдельных конструктивных элементов, расчет которых осуществляется независимо друг от друга в соответствии с предписаниями соответствующих нормативных документов.

2. Прочность элементов обеспечивается превышением их прочностных характеристик над действующими нагрузками. Мера превышения регламентируется в нормативных документах путем установления минимального значения расчетной прочности элемента R и максимального значения расчетной нагрузки Q . Значения R и Q выбираются на основании опытных данных, сопоставленных с результатами многолетней эксплуатации ВЛ.

3. Атмосферные нагрузки на провода определяются по заданной вероятности p_f их появления в любом году. При исчислении нагрузок на основании годовых максимумов указанная вероятность связана с периодом повторяемости нагрузки T (лет) соотношением $p_f = 1/T$.

В целом накоплен достаточно положительный опыт работы ВЛ с использованием указанных принципов, однако имеются и существенные недостатки.

Первое положение приводит к несогласованности прочностных характеристик элементов ВЛ между собой, и, следовательно, к недостаточной координации прочности элементов. Каждый элемент, рассчитанный по независимым требованиям соответствующих норм, имеет свой коэффициент запаса прочности или резерв прочности, зависящий, помимо нормативных требований, еще и от технологических особенностей изготовления и монтажа. При этом имеет место довольно сложный механизм определения исходных нагрузок и перехода от нормативных к расчетным значениям, усугубляющий неопределенность прочностных свойств элементов ВЛ. Недостаточно аргументированно выбираются уровни нагрузок на элементы ВЛ в аварийных режимах, что существенно влияет на материалоемкость опор. Все это приводит к непредсказуемой координации прочности элементов, что нередко наблюдается в аварийных ситуациях реальных ВЛ.

Детерминированные значения нагрузок и проч-

ностей, принимаемые согласно второму положению, могут приводить к различным значениям надежности элементов ВЛ в зависимости от случайного характера местных природных условий и объема использования наибольших значений прочностных характеристик в конкретных конструктивных элементах данной ВЛ. Расчеты всех ВЛ при этом идентичны, иначе говоря, «причисляются под одну гребенку», что не позволяет дифференцировать надежность элементов в соответствии с уровнем их значимости или ответственности. Третье положение регламентирует уровень атмосферных нагрузок на элементы ВЛ в зависимости от принятого периода их повторяемости T . Статистический способ определения нагрузок в соответствии с теоретическими распределениями, выравнивающими эмпирические данные, применяемый в методиках расчета нагрузок, наилучшим образом соответствует современным научным методам. Однако сам период повторяемости, предписываемый нормами, количественно не увязан с надежностью ВЛ и лишь качественно отражает тенденцию увеличения нагрузок по мере роста периода повторяемости и напряжения ВЛ.

В результате сказанного основным недостатком детерминистского подхода к проектированию ВЛ следует считать отсутствие возможности прогнозирования количественных показателей надежности работы ВЛ за срок ее службы.

Рассмотрим более детально вопрос учета надежности при расчетах ВЛ.

Выберем в качестве параметра, характеризующего надежность конструкции ВЛ, вероятность ее безотказной работы за данный промежуток времени, например, один год, и обозначим ее через p_s . Тогда вероятность безотказной работы ВЛ за n лет эксплуатации равна $p = p_s^n$. Пусть надежность ВЛ зависит лишь от атмосферных нагрузок (т. е. расчетная прочность элементов постоянна). Тогда $p_s = 1 - p_f$, а

$$p = (1 - 1/T)^n. \quad (1)$$

Ниже приведены значения p при $n = 50$ и различных периодах T повторяемости нагрузок:

Период повторяемости T , лет	10	25	50	150	500	1000
Вероятность превышения нагрузки за 50 лет, p	0,005	0,13	0,364	0,716	0,905	0,951
Вероятность того, что хотя бы 1 раз за 50 лет нагрузка будет превышена, q	0,995	0,87	0,636	0,284	0,095	0,049

Отсюда следует, что надежность ВЛ, зависящая от атмосферных нагрузок, ничтожно мала при

¹ Статья печатается в порядке обсуждения. Отклик см. в разделе «Дискуссии».

Таблица 1

№№ п/п	Пункты	Скорость ветра (числитель), м/с, и ветровая нагрузка (знаменатель), Н/м, при периоде повторяемости T , лет, равном					Стенка гололеда (числитель), мм, и гололедная нагрузка (знаменатель), Н/м, при периоде повторяемости T , лет, равном				
		10	25	50	150	500	10	25	50	150	500
1	Благодарное	23 10,2	24 10,7	25 11,1	26 11,6	27 12,1	9,6 8,3	11,1 10	12,1 11,2	13,5 13	14,8 14,8
2	Пятигорск	26 9,3	28 9,8	29 10,1	30 10,6	32 11,0	20,5 23,9	24 30,2	26,2 34,7	29,4 41,5	32,5 48,6
3	Дарьевка	28 11,8	30 12,7	31 13,4	32 14,2	34 15,1	30,5 44	35,7 56,5	39,1 65,5	43,9 79,4	48,5 94,0
4	Ровно	23 9,9	24 10,4	24 10,7	25 11,0	26 11,4	10,2 8,9	12,0 11,1	13,2 12,7	15,0 15,1	16,6 17,6
5	Гурьев	27 12,3	29 13,1	30 13,6	31 14,5	32 15,4	8,3 6,9	9,6 8,3	10,4 9,2	11,6 10,6	12,7 12
6	Мугоджарская	41 24,3	44 25,8	46 28,1	49 30,6	51 34,4	19,7 22,4	22,6 27,5	24,5 31,1	27,1 36,4	29,6 41,8
7	Ура-Тюбе	12 3,2	13 3,5	14 3,8	14 4,1	15 4,5	8,1 6,7	9,3 8	10,1 8,9	11,3 10,2	12,3 11,5
8	Анзобский перевал	31 13,3	33 14,6	34 15,5	36 16,8	37 18,2	33,5 50,9	37,9 62,2	40,7 70,0	44,6 81,5	48,2 93,2

периодах 10 и 25 лет, предписываемых ПУЭ, весьма мала при периоде повторяемости 50 лет и становится существенной лишь при периодах свыше 150 лет. Однако за столь продолжительные периоды невозможно собрать одинаково значимые сведения об атмосферных воздействиях. Кроме того, гололедно-ветровые воздействия не беспредельны в силу своей структуры. Таким образом, представляется реальным считаться с нагрузками, имеющими период повторяемости не более 50 лет. При этом степень превышения наблюдаемых за такой период нагрузок остается столь высокой (для $T=50$ лет она равна 0,64), что сохраняется безусловная необходимость учета нагрузок, превышающих зарегистрированные. Этот вывод хорошо известен специалистам. Принимаемые в различных нормах нагрузки, соответствующие различным, относительно небольшим периодам повторяемости,

служат не мерой надежности ВЛ, а лишь мерой сравнительного уровня атмосферных нагрузок. В табл. 1 в качестве примера приведены значения наибольших ветровых и гололедных нагрузок на провода ВЛ для 8 пунктов, расположенных в различных регионах страны при различных периодах повторяемости. Для подсчетов использовалось принятое в методиках ВНИИЭ 2-е предельное распределение Фишера — Типета [1] и формулы нагрузок согласно [2].

Возрастание нагрузок (рис. 1) происходит интенсивно при периодах повторяемости до 50 лет; далее интенсивность уменьшается, приближаясь к горизонтальным асимптотам при периодах 500 и более лет. Коэффициент увеличения нагрузок по сравнению со значениями при $T=10$ лет составляет от 1,04—1,15 (рис. 1, кривая 4 для линейной ветровой нагрузки p_4) до 1,3—2,1 (кривая 3 для линейной гололедной нагрузки p_2) соответственно при $T=25$ —500 лет. Для скорости ветра v_0 эти цифры составляют 1,05—1,2, а для стенки гололеда — соответственно 1,15—1,55, и являются достаточно стабильными.

Приведенные в качестве примеров цифры говорят о возможности учета возрастания нагрузок при больших периодах повторяемости с помощью коэффициентов. Такой путь в перспективе заслуживает внимания, и, по-видимому, подлежит дальнейшему исследованию. Возможное возрастание нагрузок при продолжительных периодах повторяемости зависит от используемого выравнивающего уравнения того или иного закона распределения. Выбор уравнения сильно влияет на результаты расчетов, в особенности в области редких значений аргументов.

В отличие от 2-го предельного распределения, используемого ВНИИЭ, в докладах МЭК [3] выравнивание рядов скоростей ветра и гололедных нагрузок производится по закону Гумбеля 1-го типа [4]. В других исследованиях показано, как

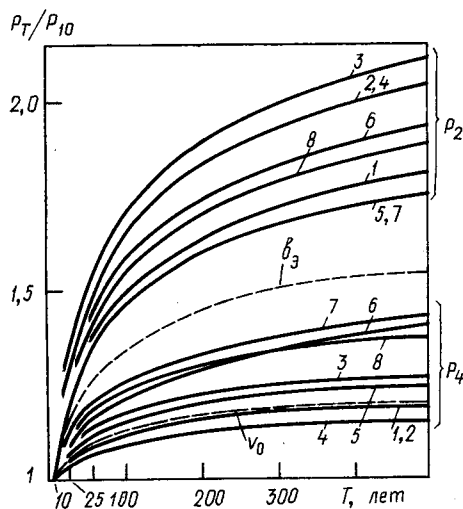


Рис. 1. Зависимости v_0 , b_3 , p_2 и p_4 от периода повторяемости T . Кривые 1—8 соответствуют метеостанциям, указанным в табл. 1

более обоснованное для определения гололедно-ветровых нагрузок, распределение Вейбулла [5].

По-видимому, обоснование выравнивающего уравнения возможно путем определения критериев согласия эмпирических и теоретических распределений. Такие обоснования далеко не всегда выполняются. Требуют переосмысления и параметры гололедной нагрузки. В качестве объективных параметров представляются масса и плотность (размеры) отложений, непосредственно измеряемые на метеостанциях. В [1] в качестве параметра используется стенка эквивалентного гололеда, получаемая путем пересчета наблюдаемых параметров с приведением приближенных оценок плотности, что снижает качество информации.

Новые подходы возможны при определении сочетаний гололедных отложений с ветром [5], в основу которых положены параметры двумерных распределений.

Наконец, говоря о нагрузках, необходимо повсеместно перейти на машинные способы обработки метеоданных. Бытующее ручное и графическое определение параметров изжило себя как субъективное, зачастую приводящее к огромным погрешностям.

Таким образом, в области атмосферных нагрузок следует подчеркнуть в качестве первоочередных следующие задачи:

обобщение многолетнего опыта наблюдений за скоростью ветра и массой гололеда с целью выявления возможных предельных значений для каждого региона;

разработка обоснований и способов определения сочетаний гололедообразований со скоростью ветра;

анализ законов распределения атмосферных воздействий и выбор наиболее репрезентативного; установление коэффициентов превышения атмосферных воздействий для длительных периодов, превышающих 50 лет;

улучшение методов определения сочетаний гололедно-ветровых воздействий;

обобщение и обоснование перехода от атмосферных воздействий к нагрузкам на элементы ВЛ;

повсеместный переход на машинные способы обработки данных наблюдений.

Новым шагом в области механических расчетов ВЛ представляется разработка и совершенствование методов расчета ВЛ с учетом гарантированной ее надежности, не зависящей от репрезентативности имеющихся наблюдений атмосферных нагрузок.

Существенного повышения уровня гарантированной надежности ВЛ можно достичь, управляя наряду с параметрами атмосферных нагрузок параметрами прочности элементов.

Прочностные характеристики элементов ВЛ — проводов, изолирующих подвесок, опор, фундаментов — имеют так же, как и воздействующие нагрузки, статистическую природу. Изменчивость характеристик обусловлена технологическими особенностями изготовления материалов, спецификой

заводов — изготовителей конструкций и строительномонтажных организаций и, наконец, местными условиями на объекте. Принято учитывать влияние различных случайных факторов на прочностные характеристики путем использования нормального закона распределения. При этом чем меньше рассеяние параметров прочности около среднего значения, тем лучше и эффективнее использование материала. В стандартах на материалы и конструкции, как правило, отсутствуют такие параметры как средние значения и коэффициент вариации. Однако имеется достаточно экспериментальных данных, позволяющих оценить значения параметров.

Таким образом, представляется возможным рассчитать вероятность непревышения прочностных свойств элементов при различных значениях воздействующих нагрузок.

Рассмотрим влияние изменчивости прочности элементов ВЛ на надежность.

При детерминистском подходе расчет элементов сооружений заключается в обеспечении соотношения

$$Q \leq R, \quad (2)$$

где Q — значение нагрузки, определяемое однозначно согласно требованиям норм; R — расчетное сопротивление материала, обусловленное также однозначно.

При вероятностном подходе возможен выбор значений Q и R , обеспечивающих данную вероятность непревышения Q над R . Математически это условие соответствует соотношению

$$p_s = 1 - p_f = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f(Q_x)F(R_x)dx, \quad (3)$$

где p_s — годовая надежность; p_f — годовая ненадежность (аварийность); Q_x — возможные значения нагрузки; R_x — возможные значения прочности; x — переменное значение аргумента (Q и R).

Выражение (3) иллюстрируется на рис. 2, где $f(Q_x)$ — кривая плотности распределения нагрузки, $F(R_x)$ — интегральная функция распределения прочности.

Произведение двух подынтегральных функций в (3) означает совместное событие, состоящее в наступлении нагрузки, превышающей Q_x , и прочности элемента менее R_x , поэтому интеграл выражения (3) можно назвать интегралом аварийности. Вычисляем значение интеграла, изменяя верхнюю хвостовую часть кривой распределения нагрузок и нижнюю хвостовую часть интегральной кривой распределения прочности. Нагрузки принимаются распределенными по закону Гумбеля 1-го типа, а коэффициенты вариации нагрузок v_Q принимаются равными 0,2; 0,3; 0,5. Прочность элементов принимается распределенной по нормальному закону с параметрами: среднее значение \bar{R} ; коэффициент вариации $v_R = \sigma/\bar{R}$; σ — среднеквадратичное отклонение. Так как нас интересует влияние изменчивости прочности, то принимаем коэффициенты вариации прочности в пределах 0—0,3. Расчеты производим исходя из совмещения

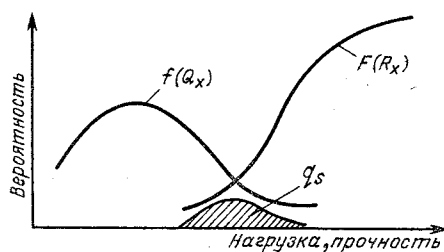


Рис. 2. Схема расчета надежности ВЛ

кривых распределений нагрузок и прочности (рис. 2) в точке, соответствующей равенству

$$Q_T = R_n, \quad (4)$$

где Q_T — нагрузка при периоде ее повторяемости T , лет; R_n — прочность при браковочном минимуме n , %.

По аналогии с докладами МЭК [3] примем число лет эксплуатации ВЛ равным 50 лет, а $n = 10$ %. Результаты численного интегрирования приведены на рис. 3 для T , равного 10, 25, 50, 150 и 500 лет. Аналогичные расчеты, выполненные при браковочном минимуме 5 %, дают снижение аварийности примерно в 1,5 раза, что равноценно соответствующему повышению надежности. Из графиков на рис. 3 следует, что влияние коэффициентов вариации нагрузок и прочностей на аварийность носит стабильный характер для всех периодов повторяемости. Аварийность по мере увеличения разброса прочностей элементов вначале снижается, а затем возрастает, имея минимум в зоне $v_R = 0,1-0,2$. Во всех случаях аварийность резко снижается с увеличением периода повторяемости T .

Наибольший интерес здесь представляет сравнение аварийности с учетом и без учета изменчивости прочности элементов. Аварийность при $v_R = 0$ соответствует вероятности превышения атмосферных воздействий (при $v_R = 0$ $p_i = 1/T$). Далее, по мере увеличения v_R , аварийность снижается примерно в три раза в зоне минимума, а далее возрастает по мере увеличения v_R с увеличивающейся интенсивностью. Напомним, что рассчитанные согласно (3) значения надежности означают надежность в любом году, т. е. p_s и p_f — это соответственно «годовая надежность» и «годовая аварийность».

Для получения значений за период эксплуатации ВЛ, равный n лет, необходимо воспользоваться выражением (1), в которое вместо $1/T$ подставляется значение интеграла аварийности p_f . Выражения (1)–(3) представляют собой основу того вероятностного механизма, который позволяет управлять надежностью объектов. Причем этот механизм позволяет решать как прямую задачу — определять надежность ВЛ в зависимости от параметров статистических рядов нагрузок и прочностей, так и обратную задачу — по заданной надежности элементов ВЛ и закономерностям изменчивости нагрузок и прочностей выбирать уровни атмосферных нагрузок и прочностей элементов.

Проблема освоения методов управления на-

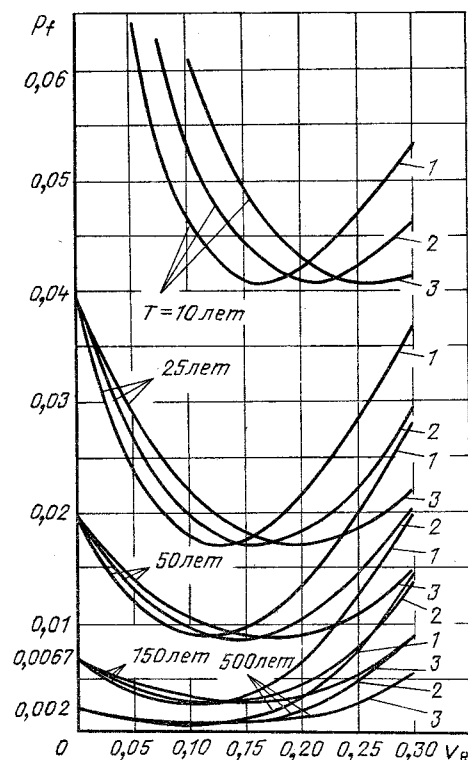


Рис. 3. Зависимость годовой аварийности p_f от вариации нагрузок и прочности: 1 — при $v_Q = 0,2$; 2 — при $v_Q = 0,3$; 3 — при $v_Q = 0,5$

дежностью ВЛ многоплановая, но ее решение позволит существенно улучшить электроснабжение и экономить большие материальные ресурсы, идущие на восстановление аварийных электрических сетей.

Можно выделить следующие основные этапы проблемы управления надежностью ВЛ:

1. Разработка методики практических расчетов ВЛ с учетом надежности.
2. Разработка показателей параметров элементов ВЛ и их статистических характеристик.
3. Расчеты надежности ВЛ различных классов напряжений, запроектированных по детерминистским нормам, и анализ уровней надежности.
4. Разработка норм проектирования с учетом надежности ВЛ как механической системы, состоящей из ряда элементов.
5. Анализ возможных уровней надежности ВЛ согласно новым нормам и выбор рекомендуемых.
6. Составление руководства для проектирования.

Одна из концепций для решения данной проблемы изложена в рекомендациях МЭК [3]. Необходимо выработать свой подход, учитывающий отечественный опыт.

Расчет элементов ВЛ на прочность и способность деформироваться основан на использовании методов предельных состояний. Для строительных конструкций накоплен многолетний положительный опыт использования этого метода. Для проводов ВЛ метод предельных состояний вводится впервые в новой (седьмой) редакции главы 2.5 ПУЭ. Основные положения и отличия

от действующего метода изложены в [6, 7]. Однако следует дополнительно подчеркнуть два новых качества. Первое — новое содержание условий работы ВЛ в режимах, определяющих нормальную эксплуатацию, второе — повышенная возможность деформации проводов, учитываемая в расчетах.

Первое качество обусловлено нормативными и методическими особенностями расчета элементов ВЛ по предельным состояниям. Для проводов упразднены понятия нормативных нагрузок и коэффициентов перегрузки, взамен которых введены расчетные нагрузки. Одновременно упразднены допускаемые напряжения и коэффициенты запаса, вместо этого вводятся расчетные сопротивления проводов. Принципиальное отличие действующей и новой методики расчета проводов состоит в вовлечении в расчетную модель провода значений нагрузок, превышающих бывшие нормативные, и значений напряжений, превышающих бывшие допускаемые. При этом те режимы, которые определяют наибольшие напряжения в проводах и наибольшие нагрузки (предельные состояния первой группы), относятся к работе провода на нагрузочной характеристике первоначального растяжения (без учета ползучести), а режимы, определяющие наибольшие деформации и отклонения проводов, — к работе провода на разгрузочной характеристике (после реализации ползучести), как показано на рис. 4. Таким образом, прочность элементов в процессе эксплуатации окажется достаточной или избыточной, так как с течением времени благодаря ползучести напряжения будут уменьшаться. Расстояния же проводов до земли, до элементов опор и между собой (предельные состояния второй группы) будут избыточными или достаточными, так как они рассчитаны при наибольших возможных деформациях.

О значениях нагрузок от атмосферных воздействий при использовании новой редакции главы 2.5 ПУЭ можно судить по рис. 1. Предложенные расчетные сопротивления наиболее часто используемых проводов марок АС приведены в табл. 2. Там же приведены допускаемые напряжения по действующим ПУЭ.

Расчетные сопротивления при низшей температуре на 50 % меньше сопротивлений при наибольших нагрузках. Из табл. 2 следует, что возрастание напряжений при переходе на расчет по пре-

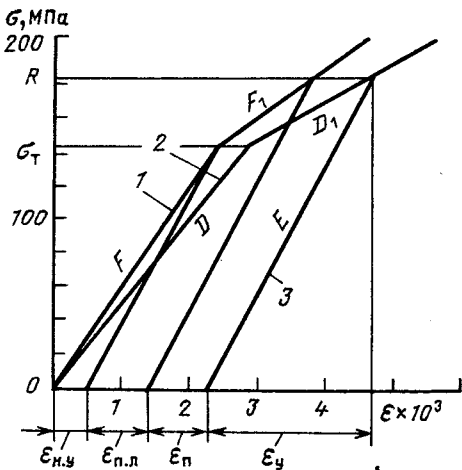


Рис. 4. Диаграмма растяжения провода и составляющие деформаций: 1 — нагрузочная характеристика первоначального растяжения; 2 — нагрузочная характеристика предельного растяжения; 3 — разгрузочная характеристика

дельным состоянием составляет при наибольших нагрузках 56—66 %, при среднегодовой температуре — 17 %. В целом работа проводов окажется в равных или измененных условиях в зависимости от соотношения новых и действующих уровней нагрузок и напряжений на конкретных линиях. При этом в некоторых случаях их надежность может возрасти, а в других — понизиться по сравнению с существующей, однако во всех случаях она будет соответствовать одинаковому новому уровню соотношения «нагрузка — прочность», т. е. одинаковому новому уровню надежности. Следовательно, скорейшее введение в действие новой редакции главы 2.5 ПУЭ — необходимое условие упорядочения расчетов ВЛ с приведением их к единому уровню надежности. Что касается разработки мер количественного нормирования уровня надежности в соответствии с изложенными выше вероятностными принципами сочетаний нагрузок и прочностей элементов, то необходима безотлагательная дальнейшая исследовательская работа для доведения их до практической реализации. Такую реализацию представляется возможным осуществить уже в восьмой редакции ПУЭ, представив ее предварительно в качестве отечественного варианта рекомендаций МЭК по разделу «Нагрузки и прочность ЛЭП».

Таблица 2

Номинальное сечение провода, мм ²	S_a/S_c	Допускаемые напряжения в % от $\sigma_{вр}$		Расчетные сопротивления в % от $\sigma_{вр}$	
		при наибольших нагрузках	при среднегодовой температуре	при наибольших нагрузках	при среднегодовой температуре
150—600	7,7—8,03	45	30	75	35
35—95	5,99—6,02	40	30	65	35
120 и более	6,14—6,28	45	30	70	35
120 и более	4,29—4,38	45	30	70	35
185—300	1,46	45	30	70	35

Примечание. S_a — площадь сечения алюминия; S_c — площадь сечения стали.

Следует особо остановиться на уровне среднеэксплуатационных напряжений. Благодаря более жесткому ограничению этого напряжения из-за условий защиты от вибрации (35 % от $\sigma_{вр}$) оно будет весьма сильно влиять на ограничение максимального напряжения в проводе в слабоголедных районах, область которых расширится по сравнению с аналогичной в действующих ПУЭ. Вместе с тем абсолютная величина среднеэксплуатационного напряжения несколько возрастает из-за общего увеличения расчетных сопротивлений. Однако на надежности ВЛ это увеличение не отразится, так как оно не может превысить безопасное по условию усталостных напряжений предельное значение, определяемое уровнем $0,35 \sigma_{вр}$.

К предельным состояниям первой группы относятся и аварийные режимы. Необходимо в дальнейшем уточнить условия выбора этих режимов и уровни нагрузок при этом. Основанием для этого могут служить неблагоприятные последствия аварий в ряде регионов страны, приводившие к массовым повреждениям опор. Зачастую развитие аварий носило каскадный характер, что может быть связано с недостаточными требованиями норм в этой части.

Режимы, относящиеся ко второй группе предельных состояний и выбираемые для соблюдения необходимых габаритных размеров и расстояний, могут по сочетанию атмосферных условий совпадать с режимами первой группы, однако напряжения и стрелы провеса при этом останутся такими же, как и в режиме группы предельных состояний, если они относятся к характеристике первоначального растяжения провода, или будут существенно иными, если они относятся к характеристике предельного растяжения или разгрузочной. В свою очередь, если режим второй группы должен быть рассчитан без учета деформаций ползучести, то он должен быть отнесен к характеристике первоначального растяжения. Выбор характеристики растяжения должен производиться независимо от группы предельных состояний и определять наиболее благоприятные условия работы провода с точки зрения надежности.

Таким образом, расчеты проводов по предельным состояниям гарантируют более высокую эксплуатационную надежность ВЛ по сравнению с расчетами по допускаемым напряжениям.

Второе обстоятельство, которое необходимо подчеркнуть, относится к увеличенной способности проводов к деформации, учитываемой в расчетах. Причем существенное значение приобретает остаточная деформация, обусловленная пластичностью и ползучестью проводов.

При использовании действующего метода расчета проводов относительные остаточные деформации ползучести учитываются лишь в расчетах монтажных напряжений и стрел провеса [8] и находятся в пределах $(0,66—0,12) \cdot 10^{-3}$ при уровне максимальных напряжений $0,45 \sigma_{вр}$. Методом предельных состояний они учитываются во всех режимах, относящихся к разгрузочной характеристике, и составляют: пластические — $(0,46—$

$1,12) \cdot 10^{-3}$, ползучести — $(1,53—0,36) \cdot 10^{-3}$ при уровне расчетных напряжений $(0,7—0,75) \sigma_{вр}$. Они в сумме соизмеримы по величине с упругими деформациями, хотя в большинстве случаев меньше последних. Их влияние на стрелы провеса весьма весомо. Размеры остаточных деформаций подтверждаются испытаниями проводов на стендах ВНИИЭ [9], а также натурными измерениями [10]. При сильных гололедах на действующих ВЛ наблюдалась вытяжка проводов, при которой последние достигали поверхности земли. В этом смысле новый метод расчета проводов за счет нового качества (учета остаточных деформаций) более прогрессивен, он позволяет расчетным путем учесть деформацию, обеспечивая требуемые габариты до земли и пересекаемых сооружений.

Введенные в метод предельных состояний модули деформаций выбраны исходя из определенных значений сочетаний «нагрузка — время». В действительности размеры деформаций ползучести зависят от истории нагружения провода. Следует продолжить исследования ползучести проводов во времени на реальных линиях с учетом статистической изменчивости атмосферных воздействий.

Выводы. 1. Существующий метод проектирования ВЛ, основанный на детерминистских принципах, обладает существенным недостатком, так как не позволяет прогнозировать количественные показатели надежности за срок службы. Необходим переход на новый метод, при котором надежность гарантируется с помощью управляемых параметров атмосферных нагрузок и прочностей элементов.

2. Уровни атмосферных нагрузок, рекомендуемые ПУЭ, не призваны обеспечивать требуемый уровень надежности ВЛ и служат лишь относительной мерой для сравнения воздействий на ВЛ в разных условиях. Предстоит качественно новый шаг в учете таких значений атмосферных нагрузок, вероятность превышения которых за период эксплуатации весьма мала.

3. Прочность элементов ВЛ должна варьироваться не только вследствие ее статистической природы, но и как управляемый параметр, существенно влияющий на надежность. Уровень расчетной прочности элементов в меньшей степени, чем уровень атмосферных нагрузок, влияет на показатели надежности ВЛ.

4. Осуществление расчетов всех элементов ВЛ методом предельных состояний является непрерывным условием подготовки нового подхода к проектированию. Подготовленное седьмое издание главы 2.5 ПУЭ, позволяющее решить эту проблему, необходимо ввести в действие по возможности быстрее.

5. Новых обоснований ждут такие важные проблемы, как учет остаточных деформаций проводов, координация прочности элементов ВЛ, уровни продольных нагрузок на ВЛ (аварийные и неуравновешенные).

6. Решение изложенных в статье проблем явится существенным шагом в создании ВЛ с

гарантированной за срок службы надежностью, повышении качества и технико-экономических показателей ВЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по расчету климатических нагрузок на ВЛ и построению региональных карт с повторяемостью 1 раз в 25 лет — М.: ВНИИЭ, 1989.
2. Правила устройства электроустановок. — М.: Энергоатомиздат, 1976.
3. Рекомендации по воздушным линиям. Нагрузки и прочность ЛЭП — МЭК, 1988.
4. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. — М.: Мир, 1965.
5. Гарцман Л. Б. Вероятности гололедно-ветровых и температурных воздействий на ЛЭП. — Л.: Гидрометиздат, 1987.
6. Основные положения метода расчета проводов ВЛ по

предельным состояниям / В. В. Бургсдорф, Е. П. Никифоров, А. С. Зеличенко и др. — Электрические станции, 1984, № 2.

7. Расчет напряжений и стрел провеса проводов ВЛ по методу предельных состояний / Л. М. Кесельман, Е. П. Никифоров, Ж. Ф. Зальцман, Т. И. Рыкова — Электрические станции, 1984, № 3.

8. Расчет монтажных напряжений и стрел провеса проводов и тросов воздушных линий с учетом остаточных деформаций / А. С. Зеличенко, Л. М. Кесельман, И. М. Коляков, В. Г. Хотинский — Электрические станции, 1978, № 2.

9. Никифоров Е. П. Расчет неизолированных проводов ВЛ с учетом пластических деформаций после монтажа. — Электрические станции, 1981, № 5.

10. Дуров Е. В., Кесельман Л. М., Трейгер А. С. Измерение остаточных деформаций сталеалюминиевых проводов на действующих ВЛ. — Электрические станции, 1982, № 12.

[01.08.90]

УДК 621.315.1.001.11

О классификации и терминологии в области воздушных линий электропередачи новых типов

ЗУЕВ Э. Н., ФЕДИН В. Т.

1. Постановка задачи. В последние годы было проведено достаточно большое количество работ, связанных с совершенствованием и развитием конструктивно-схемных решений воздушных линий (ВЛ) электропередачи переменного тока. Эти работы были направлены на повышение пропускной способности ВЛ, снижение отрицательного экологического влияния, повышение управляемости и живучести ВЛ.

Как известно, передаваемая по линии мощность может быть ограничена либо условием допустимого нагрева ее токоведущих элементов, либо пределом статической устойчивости параллельной работы синхронных генераторов в связываемых линиях подсистемах. Применяя термин «пропускная способность», обычно подразумевают лишь одно из этих двух ограничений, а именно предел передаваемой по ВЛ мощности по условию статической устойчивости в случае, когда линия соединяет два узла системы с фиксированными напряжениями. Этот предел для идеализированной линии определяется по известной формуле

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{нат}} / \sin \beta l,$$

где β — коэффициент изменения фазы волны; l — длина линии; $P_{\text{нат}}$ — натуральная мощность, равная $P_{\text{нат}} = U_{\text{ном}}^2 / z_{\text{в}}$; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение линии; $z_{\text{в}}$ — волновое сопротивление.

Отсюда видно, что абсолютное значение предела передаваемой мощности пропорционально натуральной мощности. Поэтому для линий с повышенным пределом передаваемой мощности, выполненных по новым конструктивным решениям, в ряде работ используют термин «ВЛ повышенной натуральной мощности» [1]. В таких ВЛ увеличение натуральной мощности обеспечивается за счет снижения волнового сопротивления. Наряду с этим

термином для обозначения разновидностей таких ВЛ в отечественной и зарубежной технической литературе широко используются такие названия как «компактные», «управляемые самокомпенсирующиеся», «многофазные», «комбинированные», «трехконтурные» и т. п. Вместе с тем отсутствие четких определений разных типов нетрадиционных ВЛ не позволяет в большинстве случаев обоснованно судить как об их сходных чертах, так и об их различиях.

Общим, несомненно, является не только повышенная натуральная мощность, но и то, что новые конструкции ВЛ позволяют уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду за счет уменьшения напряженности электрического поля под линией на уровне земли. Кроме того, как правило, существенно уменьшается изымаемая из землепользования территория за счет сокращения полосы отчуждения под трассу линии.

При наличии на ВЛ возможности режимных изменений взаимного положения векторов фазных напряжений, приложенных к фиксированно расположенным относительно друг друга проводам, эти линии представляют собой активные элементы энергосистемы и могут участвовать в регулировании режимов.

За счет применения специальных схемных решений может быть достигнуто повышение живучести ВЛ, проявляющееся в переходе на работу по соответствующей схеме послеаварийного режима (в зависимости от вида повреждения ВЛ) с ограниченным числом отключенных от источников питания проводов.

Из многочисленных предложенных вариантов новых конструктивно-схемных решений ВЛ, очевидно, ни один не обладает явными преимуществами по всем перечисленным факторам. Поэто-

му естественно, что параллельно ведется разработка различных конструкций ВЛ.

Однако на сегодняшний день отсутствует общепринятая классификация и соответствующая ей терминология в области нетрадиционных ВЛ. Поэтому представляется целесообразным выполнить соответствующую систематизацию и наметить вариант такой классификации.

2. Основные определения и признаки классификации. Обобщение современных знаний в области передачи электроэнергии по ВЛ трехфазного переменного тока позволяет рассматривать такие линии как многопроводные (многоэлементные) системы иерархического типа с упорядоченным в соответствии с определенными принципами расположением элементов в пространстве, обеспечивающим ту или иную степень их электромагнитного взаимодействия. С наиболее общих позиций указанная иерархическая структура некоторого множества токоведущих элементов (ТВЭ) представляется в виде совокупности подмножеств, отличающихся по номинальному напряжению $U_{ном}$, числу цепей n_u одного напряжения $U_{ном}$ и числу проводов в фазах каждой из цепей N_{ϕ} . Схематически такая структура показана на рис. 1.

В соответствии с рис. 1 вся совокупность токоведущих элементов U_n может быть разбита на подмножества $U_{n_u} \in U_n$ ($1 \leq u \leq l$), отличающиеся

величиной $U_{ном}$, т. е. $n_u = \sum_{i=1}^l n_{ui}$. В свою очередь, каждое из этих подмножеств представляет собой совокупность подмножеств более низкого уровня $U_{n_{uk}} \in U_{n_u}$ ($1 \leq k \leq m$), каждое из которых соответствует отдельной цепи линии данного номинального напряжения. При этом $n_u = \sum_{k=1}^m n_{uk}$, где

n_{uk} — число ТВЭ, принадлежащих k -й цепи u -го номинального напряжения. Наконец, подмножества наиболее низкого уровня являются совокупности ТВЭ, образующие фазы данной цепи ($U_{N_{\phi uk}} \in U_{n_{uk}}$), причем $n_{uk} = N_{Auk} + N_{Buk} + N_{Cuk}$. В общем случае $N_{Auk} \neq N_{Buk} \neq N_{Cuk}$. В частном же слу-

чае, при равенстве числа проводов в фазе ($N_{Auk} = N_{Buk} = N_{Cuk} = N_{uk}$), очевидно, $n_{uk} = 3N_{uk}$ и $n_u = 3 \sum_{k=1}^m N_{uk}$.

Таким образом, в рассмотренной обобщенной структуре выделяются три иерархических уровня: фаза, цепь и линия данного номинального напряжения.

Сформулируем понятия «фазы» и «цепи» ВЛ трехфазного переменного тока.

Фаза ВЛ — это совокупность N проводов ($N=1, 2, \dots$), находящихся под одинаковым потенциалом относительно земли $U_{\phi}(t) = U_{\phi \max} \sin(\omega t + \varphi_{\phi})$.

По признаку одновременности использования проводов фазы ВЛ можно разделить на фазы с постоянной (фиксированной) структурой и фазы с переменной структурой.

Фаза с фиксированной структурой характеризуется тем, что все ее провода подключены к шинам передающей (и приемной) подстанции через фазу одного (общего) выключателя и коммутируются только одновременно. В такой фазе между проводами в пролете отсутствуют изоляционные элементы.

Фаза с переменной структурой отличается тем, что каждый ее провод (или часть проводов) подключен к шинам передающей (и приемной) подстанции через фазу собственного (отдельного) выключателя и коммутируется либо независимо от других проводов, либо совместно с ними. В фазе с переменной структурой между парами проводов (всеми или частью) имеются изоляционные элементы.

Таким образом, при фазе с постоянной структурой во всех режимах работы ВЛ состав проводов остается неизменным. При фазе с переменной структурой в зависимости от режима ВЛ возможно перестроение (перегруппировка) состава и взаимного расположения проводов по фазам.

Цепь ВЛ — это совокупность трех фаз (А, В, С), вектора фазных напряжений которых в нормальном режиме образуют симметричную звезду.

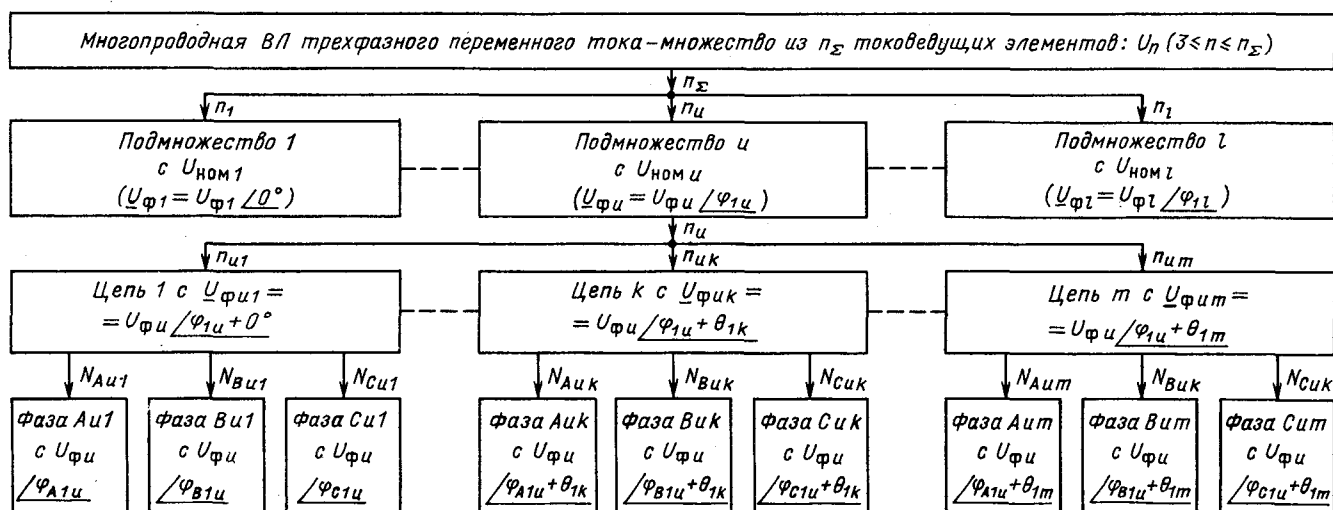


Рис. 1. Обобщенная структура многопроводной ВЛ

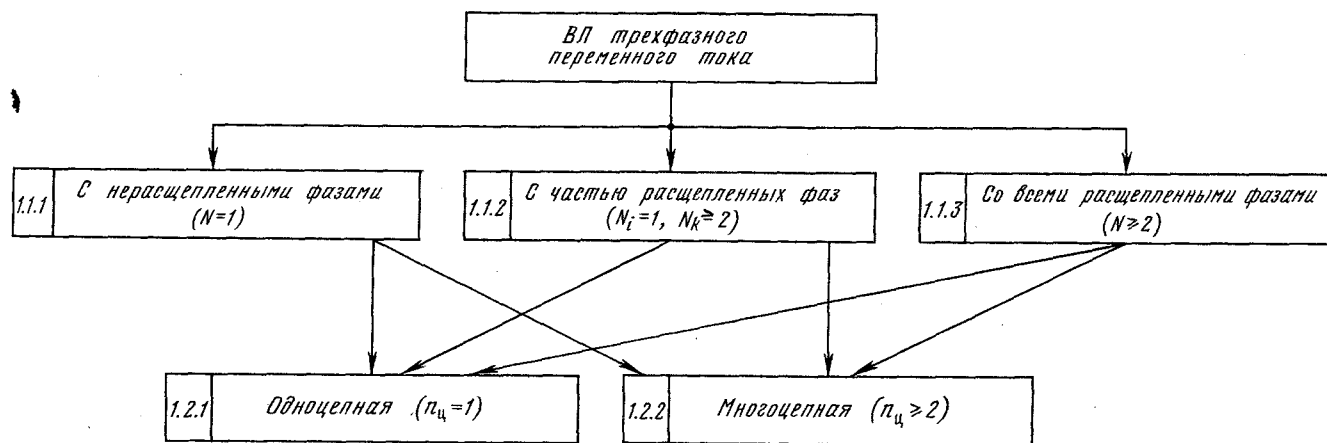


Рис. 2. Классификация ВЛ по числу токоведущих элементов

($U_{A \max} = U_{B \max} = U_{C \max}$; $\varphi_B - \varphi_A = 120^\circ$; $\varphi_C - \varphi_B = 120^\circ$).

Для проведения классификации необходимо прежде всего установить признаки, позволяющие выделить характерные типы рассматриваемых ВЛ. В качестве таких признаков целесообразно принять:

1. Количество токоведущих элементов.
2. Первичные электрические характеристики.
3. Геометрические характеристики.
4. Схемы коммутации проводов фаз.
5. Способы и средства обеспечения сдвига векторов напряжений фаз.

3. Первый признак. Классификация по первому признаку схематически представлена на рис. 2, где выделены ВЛ, различающиеся:

по числу проводов N в фазе (1.1) — со всеми нерасщепленными фазами (1.1.1), с частью расщепленных фаз (1.1.2) и со всеми расщепленными фазами (1.1.3);

по числу цепей n_c (1.2) — одноцепная (1.2.1) и многоцепная (1.2.2).

Многоцепная ВЛ — это совокупность n_c цепей ($n_c \geq 2$), каждая из которых на приемном и передающем концах коммутируется отдельными (собственными) выключателями. При фазах с постоянной структурой каждая цепь многоцепной и одноцепной ВЛ содержит по одному выключателю в фазе. При фазах с переменной структурой число выключателей $n_{\text{в}}$ на фазу находится в пределах $1 \leq n_{\text{в}} \leq N$. При $n_c = 2$ линия называется «двухцепной», при $n_c = 3$ — «трехцепной» и т. д.

4. Второй признак. Многоцепные линии необходимо классифицировать по первичным электрическим характеристикам, к числу которых следует отнести:

- сдвиг векторов одноименных фаз разных цепей (θ_c);
- номинальные напряжения различных цепей ($U_{\text{ном.ц}}$).

В соответствии с этим на рис. 3 представлена классификация многоцепных ВЛ по второму признаку, где выделены ВЛ, различающиеся:

- по наличию сдвига векторов одноименных фаз (2.1) — «синфазная», т. е. с $\theta_c = 0$ (2.1.1) и «многофазная», т. е. с $\theta_c \neq 0$ (2.1.2);
- по возможности изменения сдвига векторов од-

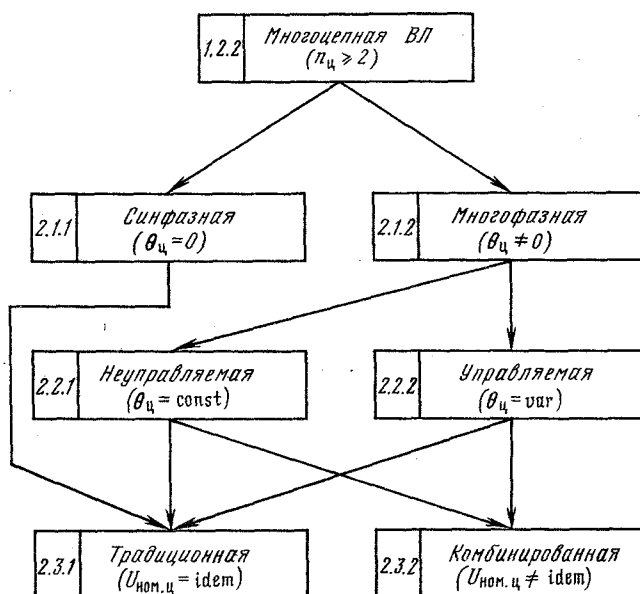


Рис. 3. Классификация многоцепных ВЛ по первичным электрическим характеристикам

ноименных фаз (2.2) — «неуправляемая» (с фиксированным сдвигом), т. е. с $\theta_c = \text{const}$ (2.2.1) и «управляемая» (с регулируемым сдвигом), т. е. с $\theta_c = \text{var}$ (2.2.2) [2];

по различию номинальных напряжений различных цепей (2.3) — «традиционная» с одинаковыми номинальными напряжениями цепей, т. е. с $U_{\text{ном.ц}} = \text{idem}$ (2.3.1) и «комбинированная» [3] (с разными номинальными напряжениями цепей), т. е. с $U_{\text{ном.ц}} \neq \text{idem}$ (2.3.2).

В качестве иллюстрации на рис. 4 показаны векторные диаграммы фазных напряжений для двухцепной линии в традиционном синфазном варианте (рис. 4, а), при $\theta_c = 30^\circ$ (рис. 4, б) и $\theta_c = 180^\circ$ (рис. 4, в) при $U_{\text{ном.ц}} = \text{idem}$, а также для двухцепной комбинированной ВЛ (рис. 4, г) при θ_c , отличном от нуля, в силу того, что между системами шин источника питания с различными номинальными напряжениями всегда объективно имеет место сдвиг векторов напряжений одноименных фаз, поскольку между этими шинами и выводами генераторов включены трансформаторы

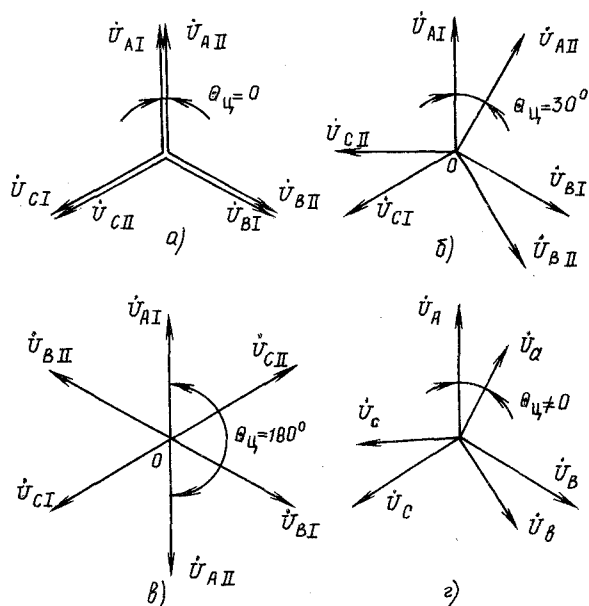


Рис. 4. Векторные диаграммы фазных напряжений двухцепной линии: а — синфазной; б — со сдвигом векторов одноименных фаз на 30° ; в — с цепями, работающими в режиме противофазы ($\theta_u = 180^\circ$); г — комбинированной

с различными комплексными сопротивлениями. Требуемый угол θ_u может быть создан с помощью специальных средств, о которых будет идти речь при рассмотрении пятого признака классифика-

ции. На рис. 4, г вектора цепи с более высоким номинальным напряжением индексированы прописными буквами (А, В, С), а вектора цепи меньшего напряжения — строчными (а, б, с). Масштабное соотношение векторов напряжений разных цепей здесь не отражает какого-либо реального сочетания номинальных напряжений (например, 220 и 110 кВ), демонстрируя лишь сам факт их различия.

5. Третий признак. К числу геометрических характеристик, по которым различаются ВЛ в соответствии с третьим признаком классификации, относятся:

3.1 — наличие сближения фаз;

3.2 — взаимное расположение проводов в расщепленной фазе;

3.3 — взаимное расположение расщепленных фаз.

Для многоцепных ВЛ, помимо указанных трех аспектов, необходимо дополнительно классифицировать их по признакам, связанным с взаимным расположением цепей и с соответствием числа проводов в фазах разных цепей, что будет рассмотрено далее.

На рис. 5 представлена классификация одноцепных ВЛ по признакам 3.1—3.3. По признаку наличия сближения фаз можно выделить линии обычного типа, т. е. без сближения фаз (3.1.1) или со сближением фаз только в пролете (3.1.2) за счет установки междупазных изолирующих стоек (как правило, из стеклопластика). При этом

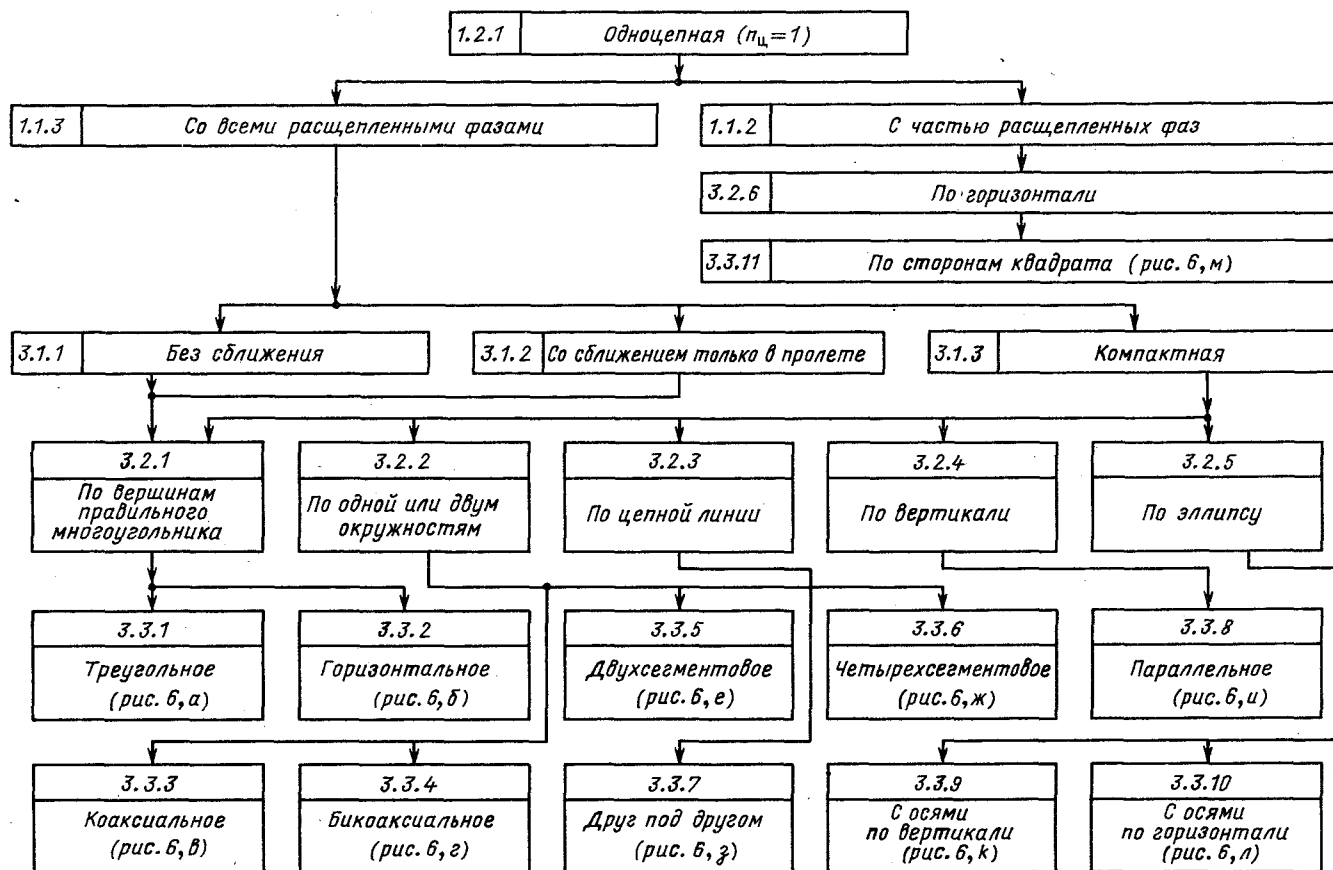


Рис. 5. Классификация одноцепных ВЛ по геометрическим характеристикам

фазы размещаются по обе стороны от стойки опоры.

Линии со сближенными фазами как в пролете, так и на опоре (3.1.3) получили название «компактных». Термин «одноцепная компактная ВЛ» характеризует прежде всего сокращение полосы отчуждения под трассу за счет уменьшения междофазных расстояний при размещении фаз только по одну сторону от стойки опоры. Это достигается при использовании конструкций опор так называемого «охватывающего» типа с арочной или вантовой траверсой [4].

На существующих ВЛ с $U_{\text{ном}} \geq 500$ кВ провода расщепленной фазы располагаются по вершинам правильного многоугольника (3.2.1). Такое расположение может быть использовано и для компактных линий. Однако помимо этого предложен ряд стандартных расположений проводов, таких как расположение по одной или двум окружностям (3.2.2), по цепной линии или параболическое (3.2.3), по вертикальной прямой (3.2.4) и по полному или неполному эллипсу (3.2.5).

Для ВЛ с одной расщепленной фазой и двумя нерасщепленными фазами провода расщепленной фазы, изолированные друг от друга, могут располагаться по горизонтали (3.2.6). Такие линии

получили название «одноцепные ВЛ с резервной фазой» [1, 5].

Все эти варианты взаимного расположения проводов фазы показаны на рис. 6, где наряду с этим представлены и характерные взаимные расположения фаз *A*, *B*, *C* одноцепных компактных ВЛ [4, 4, 6, 7]:

3.3.1 — по вершинам треугольника (рис. 6, *a*);
3.3.2 — по горизонтали (рис. 6, *б*);
3.3.3 — полностью коаксиальное (рис. 6, *в*);
3.3.4 — двойное коаксиальное (рис. 6, *г, д*);
3.3.5 — одна фаза — по окружности, а две другие — по сегментам (рис. 6, *е*);

3.3.6 — одна фаза — по окружности, а каждая из двух других — по двум сегментам (рис. 6, *ж*);

3.3.7 — по вертикали, друг под другом для параболических фаз (рис. 6, *з*);

3.3.8 — в вертикальных параллельных плоскостях для плоских фаз (рис. 6, *и*);

3.3.9 — с вертикальным расположением главных (больших) осей эллипсов (рис. 6, *к*);

3.3.10 — с горизонтальным расположением больших осей эллипсов (рис. 6, *л*);

3.3.11 — с расположением в двух углах квадрата проводов одной расщепленной фазы, а в двух

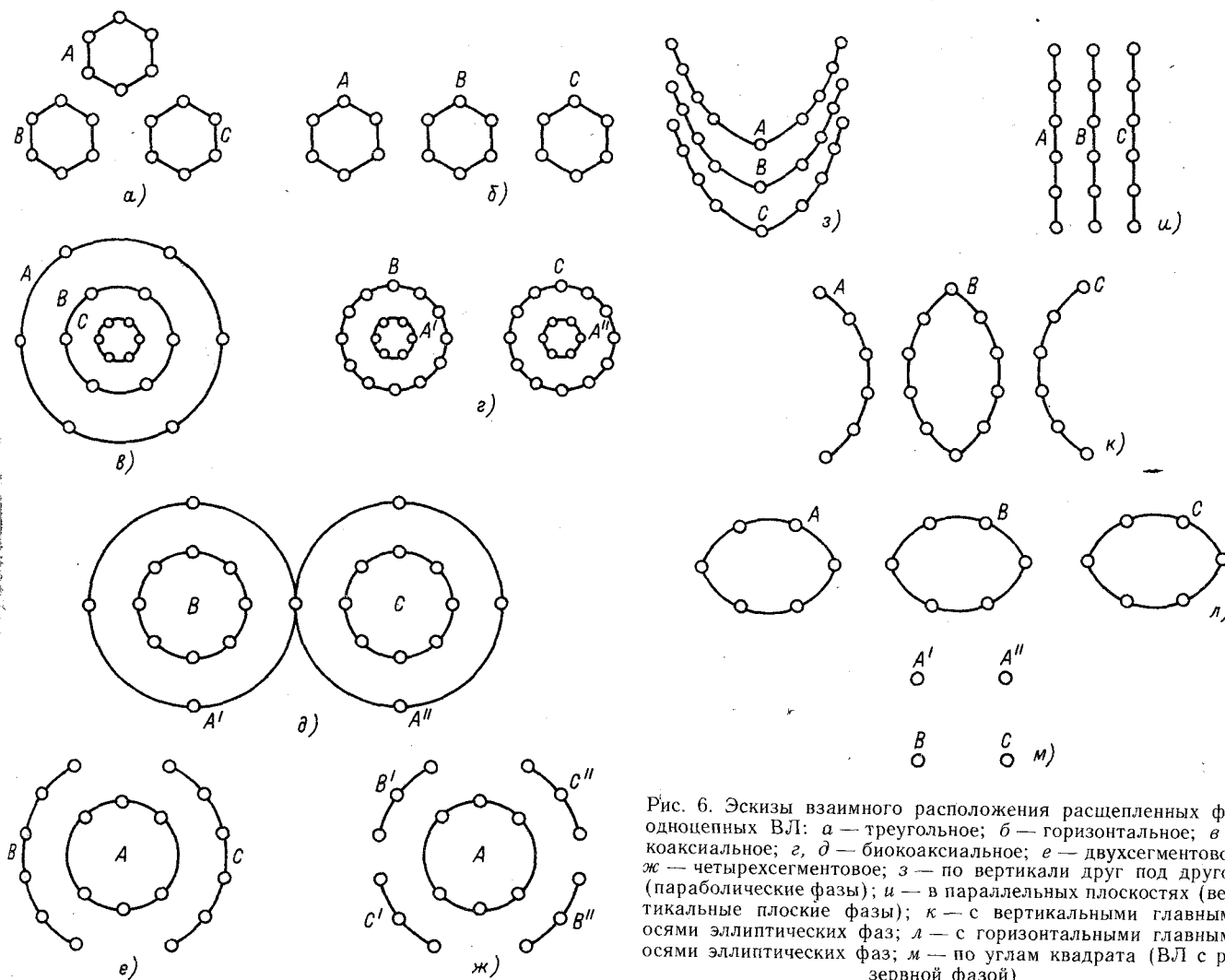


Рис. 6. Эскизы взаимного расположения расщепленных фаз одноцепных ВЛ: *a* — треугольное; *б* — горизонтальное; *в* — коаксиальное; *г, д* — биоксоаксиальное; *е* — двухсегментовое; *ж* — четырехсегментовое; *з* — по вертикали друг под другом (параболические фазы); *и* — в параллельных плоскостях (вертикальные плоские фазы); *к* — с вертикальными главными осями эллиптических фаз; *л* — с горизонтальными главными осями эллиптических фаз; *м* — по углам квадрата (ВЛ с резервной фазой)

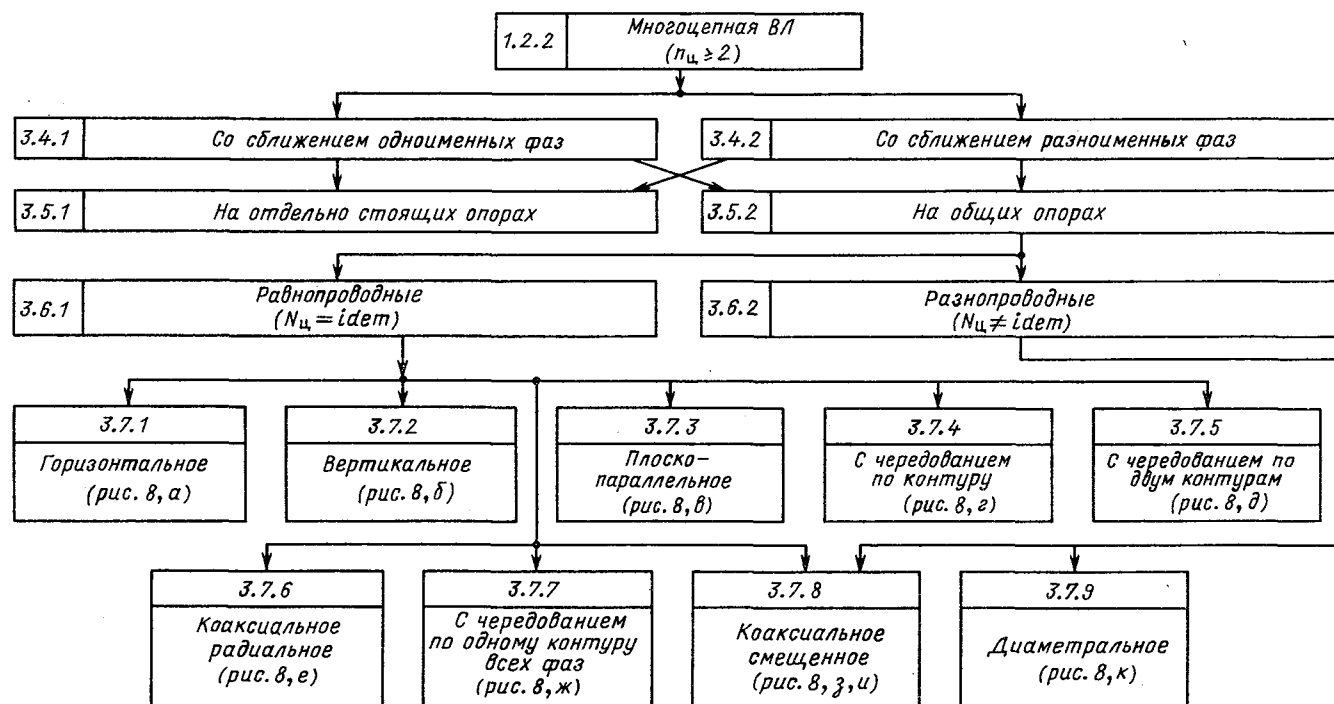


Рис. 7. Классификация многоцепных ВЛ по геометрическим характеристикам.

других углах квадрата — проводов других, не расщепленных фаз (рис. 6, м).

Перейдем теперь к рассмотрению многоцепных линий. По сравнению с одноцепными компактными линиями в многоцепных линиях может быть достигнуто дополнительное повышение натуральной мощности за счет использования эффекта взаимного влияния цепей [8]. Увеличение взаимного электромагнитного и электростатического влияния цепей обеспечивается за счет их сближения. Однако эффект от сближения может оказаться как позитивным, так и негативным в смысле изменения величины натуральной мощности. Увеличение натуральной мощности обеспечивается лишь в том случае, если сближаются фазы разных цепей, вектора напряжений которых сдвинуты на максимально возможный угол ($\theta_{\text{ц}}$), в пределе равный 180° . Исходя из этого положения был предложен ряд нетрадиционных конструкций ВЛ компактного типа (с расщепленными и нерасщепленными фазами).

Первым из числа признаков классификации многоцепных ВЛ по их геометрическим характеристикам следует считать (рис. 7) сближение фаз (3.4): 3.4.1 — одноименных, 3.4.2 — разноименных. Следующий признак (3.5) — расположение цепей на опорах: 3.5.1 — отдельно стоящих, 3.5.2 — общих.

Количество проводов в фазах различных цепей ($N_{\text{ц}}$) может быть неодинаковым. Характерным примером здесь могут служить комбинированные ВЛ с обычным (не глубоким) расщеплением фаз (например, ВЛ с размещением на одной опоре цепи 750 кВ с $N_{\text{ц1}}=5$ и цепи 330 кВ с $N_{\text{ц2}}=2$). Однако, как будет ясно из дальнейшего, такая ситуация может иметь место и в случае размещения на общей опоре цепей с одинаковым номи-

нальным напряжением, т. е. в этом смысле «традиционных» (см. рис. 3). В связи с этим приходится в качестве следующего признака классификации выделить соотношение числа проводов в фазах разных цепей (3.6). По этому признаку будем различать ВЛ с одинаковым (3.6.1) и разным (3.6.2) числом проводов в фазах, которые для краткости могут быть названы соответственно «равнопроводными» и «разнопроводными».

Наконец, последним из числа признаков, связанных с геометрическими характеристиками многоцепных ВЛ, является взаимное расположение сближенных фаз разных цепей (3.7). Многообразие возможных компоновок сближенных фаз показано на рис. 8 применительно к наиболее реальному случаю, а именно — двухцепной линии, хотя аналогичным образом могут классифицироваться и ВЛ с $n_{\text{ц}} > 2$. На рис. 8 фазы одной цепи обозначены A_1, B_1, C_1 , а второй — A_2, B_2, C_2 , причем для большей наглядности составляющие расщепленных фаз второй цепи показаны зачерненными кружками. Итак, расположение сближенных фаз в поперечном сечении линии может быть:

- 3.7.1 — горизонтальное (рис. 8, а);
- 3.7.2 — вертикальное (рис. 8, б);
- 3.7.3 — плоскопараллельное (рис. 8, в);
- 3.7.4 — с чередованием по контуру (рис. 8, г);
- 3.7.5 — с чередованием по двум контурам (рис. 8, д);
- 3.7.6 — коаксиальное радиальное (рис. 8, е);
- 3.7.7 — с чередованием по одному контуру всех фаз (рис. 8, ж);
- 3.7.8 — коаксиальное смещенное (рис. 8, з, и);
- 3.7.9 — плоскопараллельное с чередованием (диаметральное) (рис. 8, к).

Линии с чередованием фаз по контуру в литературе получили название «многофазных» [9, 10].

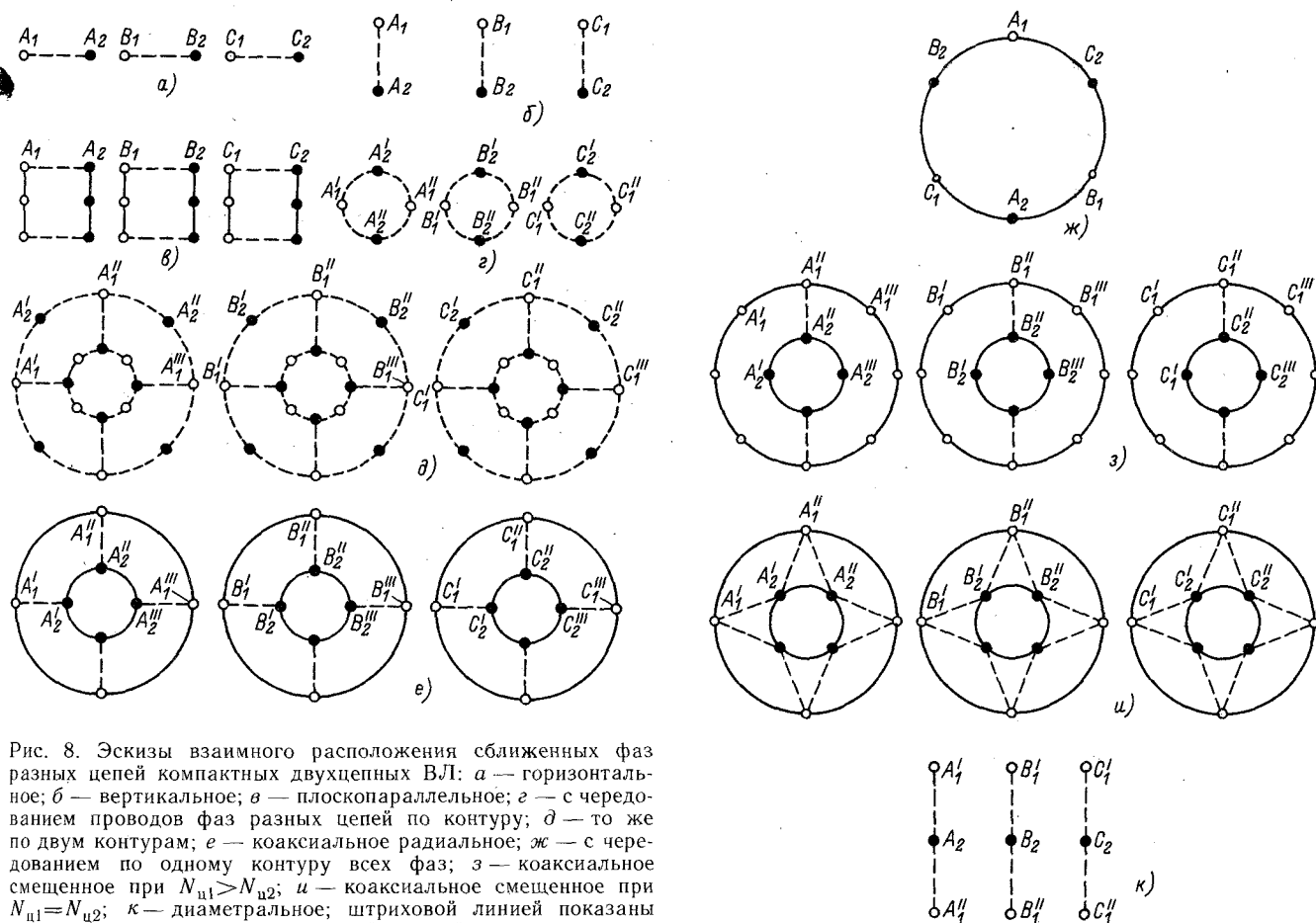


Рис. 8. Эскизы взаимного расположения сближенных фаз разных цепей компактных двухцепных ВЛ: а — горизонтальное; б — вертикальное; в — плоскопараллельное; г — с чередованием проводов фаз разных цепей по контуру; д — то же по двум контурам; е — коаксиальное радиальное; ж — с чередованием по одному контуру всех фаз; з — коаксиальное смещенное при $N_{u1} > N_{u2}$; и — коаксиальное смещенное при $N_{u1} = N_{u2}$; к — диаметрально; штриховой линией показаны изолирующие распорки, сплошной линией — дистанционные неизолирующие распорки

Линия с числом фаз N_{ϕ} , кратным трем, может считаться «многоцепной» с числом цепей $n_{\text{ц}} = N_{\phi}/3$ ($N_{\phi} = 6, 9, 12, 15, 18, \dots$; $n_{\text{ц}} = 2, 3, 4, 5, 6, \dots$) с фиксированным сдвигом векторов напряжений ($\theta_{\text{ц}} = 60^\circ, 40^\circ, 30^\circ, 24^\circ, 20^\circ, \dots$). На рис. 8, ж показан один из возможных вариантов «многофазной» линии с числом фаз, равным шести. Перестановкой по контуру можно получить 16 различных комбинаций взаимного расположения проводов фаз такой линии. Векторная диаграмма напряжений для расположения проводов фаз по рис. 8, ж приведена на рис. 4, в.

При одинаковом количестве проводов в фазах разных цепей ($N_{\text{ц}} \neq \text{idem}$) возможно лишь «коаксиальное смещенное» расположение проводов (см. рис. 8, з). В частном случае внутренняя фаза коаксиала может быть нерасщепленной ($N_{u2} = 1$). При этом внешняя фаза коаксиала может быть расщеплена на 2 (см. рис. 8, к) или более проводов.

6. Четвертый признак. По схемам коммутации проводов расщепленных фаз ВЛ могут быть разделены следующим образом:

4.1 — с подключением всех проводов расщепленной фазы через один выключатель;

4.2 — с подключением каждого провода (или части проводов) каждой фазы (или части фаз) через отдельно управляемый выключатель.

В первом случае ВЛ характеризуется фазами

с постоянной (фиксированной) структурой. Во втором случае ВЛ содержит фазы с переменной структурой.

Пример первого варианта исполнения ВЛ показан на рис. 9, а, где каждая фаза расщеплена на два провода. Эта схема может использоваться как при отсутствии изоляции между проводами расщепленной фазы (см. рис. 8, в, е, з, и; рис. 5, а—е, з—л), так и при наличии между ними изоляционных элементов (см. рис. 8, г, д, ж, к, рис. 6, е, м). На рис. 9, б приведен пример такой ВЛ для случая расположения проводов по рис. 6, м, где фаза А расщеплена на два провода, а фазы В и С не расщеплены. Провод А'' фазы А может быть использован для замены проводов А', В, С (резервная фаза). Очевидно, что в этом случае провода расщепленной фазы должны быть изолированы относительно друг друга на расчетное рабочее напряжение (см. рис. 8, г, д, ж, к, рис. 6, е, м).

7. Пятый признак. Рассмотрим теперь последний из намеченных признаков классификации ВЛ. Он относится к многоцепным линиям. Сдвиг векторов напряжений фаз разных цепей $\theta_{\text{ц}}$ может быть:

фиксированным (неуправляемая ВЛ, 2.2.1);
регулируемым (управляемая ВЛ, 2.2.2).

Он может обеспечиваться следующими способами и средствами:

5.1 — трансформаторами;

5.2 — специальными фазорегулирующими устройствами [2];

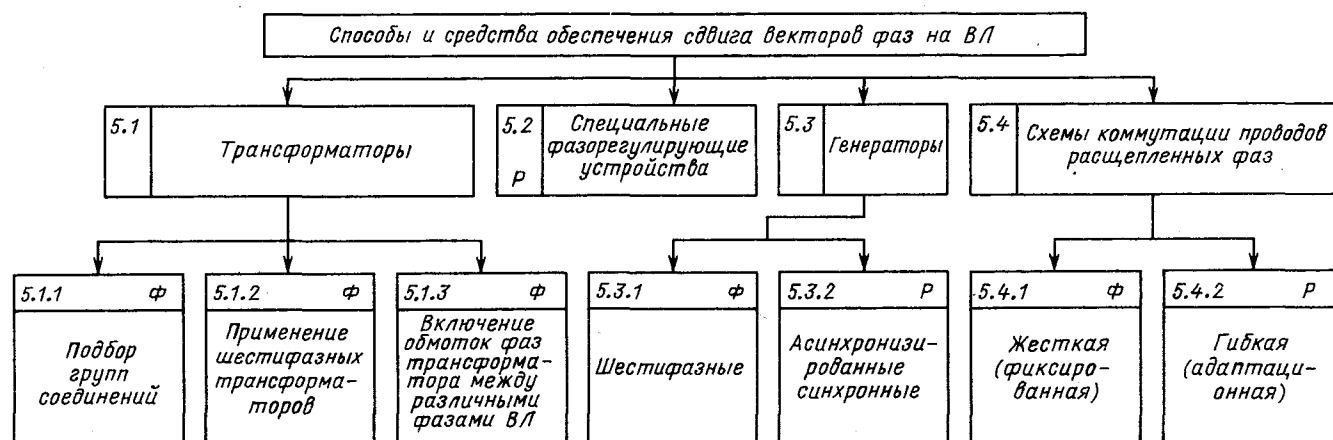


Рис. 10. Классификация многофазных ВЛ по способам и средствам обеспечения сдвига векторов фаз напряжений на ВЛ

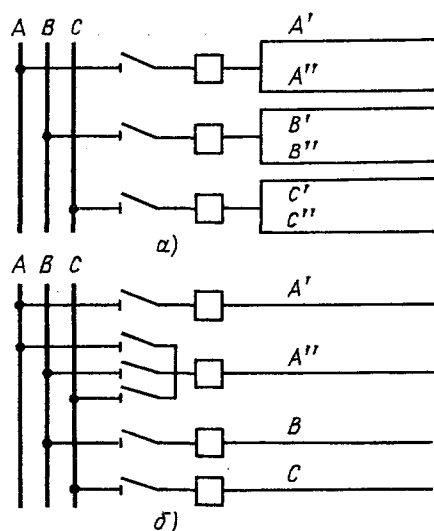


Рис. 9. Принципы подключения проводов расщепленных фаз: а — через один выключатель; б — через различные выключатели

5.3 — специальными генераторами;

5.4 — специальными схемами коммутации различных фаз ВЛ и проводов расщепленных фаз.

Классификация ВЛ по этому признаку приведена на рис. 10. Здесь варианты с фиксированным сдвигом векторов напряжений обозначены буквой «Ф», а с регулируемым — буквой «Р».

Создание фазового сдвига с помощью трансформаторов осуществляется следующими способами:

5.1.1 — подбором групп соединений трансформаторов по концам ВЛ [8]. При включении таких трансформаторов со схемами соединений обмоток, отличающихся «на 6 ч», создается режим противофазы напряжений (см. рис. 4, в);

5.1.2 — применением специальных шестифазных трансформаторов, в которых напряжения соседних фаз сдвинуты на угол 60° [6, 9] (см. рис. 4, в);

5.1.3 — включением на приемном конце ВЛ обмоток фаз трансформатора между различными фазами ВЛ [6]. При этом обмотка фазы трансформатора может быть подключена на двойное фазное, либо на фазное напряжение.

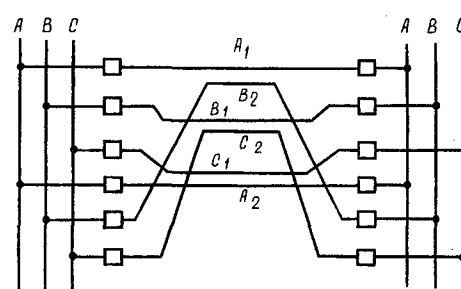


Рис. 11. Схема спаренных фаз

Возможно применение следующих видов генераторов для создания фазового сдвига на ВЛ;

5.3.1 — шестифазных [11]. С их помощью две трехфазные системы напряжений могут быть сдвинуты на 180° либо на 60° . Тогда путем соответствующего подключения к таким генераторам сближенных фаз разных цепей ВЛ можно на ней создать требуемый фазовый сдвиг [6];

5.3.2 — асинхронизированных синхронных [12].

Регулирование угла фазового сдвига осуществляется путем изменения напряжения возбуждения требуемой частоты.

Сдвиг векторов фаз напряжений многофазных ВЛ может обеспечиваться и с помощью следующих принципиальных схем коммутации проводов:

5.4.1 — жесткой (фиксированной). Эта схема может обеспечивать только фиксированный угол $\theta_{\text{н}}$. Пример такой схемы, получившей название «схемы спаренных фаз» [13], применительно к ВЛ по рис. 8, а—е, з—к показан на рис. 11. Эта схема соответствует случаю попарного сближения разноименных фаз разных цепей;

5.4.2 — гибкой (адаптивной). Пример схемы применительно к ВЛ по рис. 8, г (две цепи, два провода в фазе каждой цепи, изолированные друг от друга, попарно сближены одноименные фазы разных цепей) приведен на рис. 12. Здесь к шинам A_1, B_1, C_1 и A_2, B_2, C_2 предполагается подведение напряжений в соответствии с векторной диаграммой по рис. 4, в. Каждый провод расщепленной фазы с помощью выключателей и трехпозиционных коммутационных аппаратов 1 может

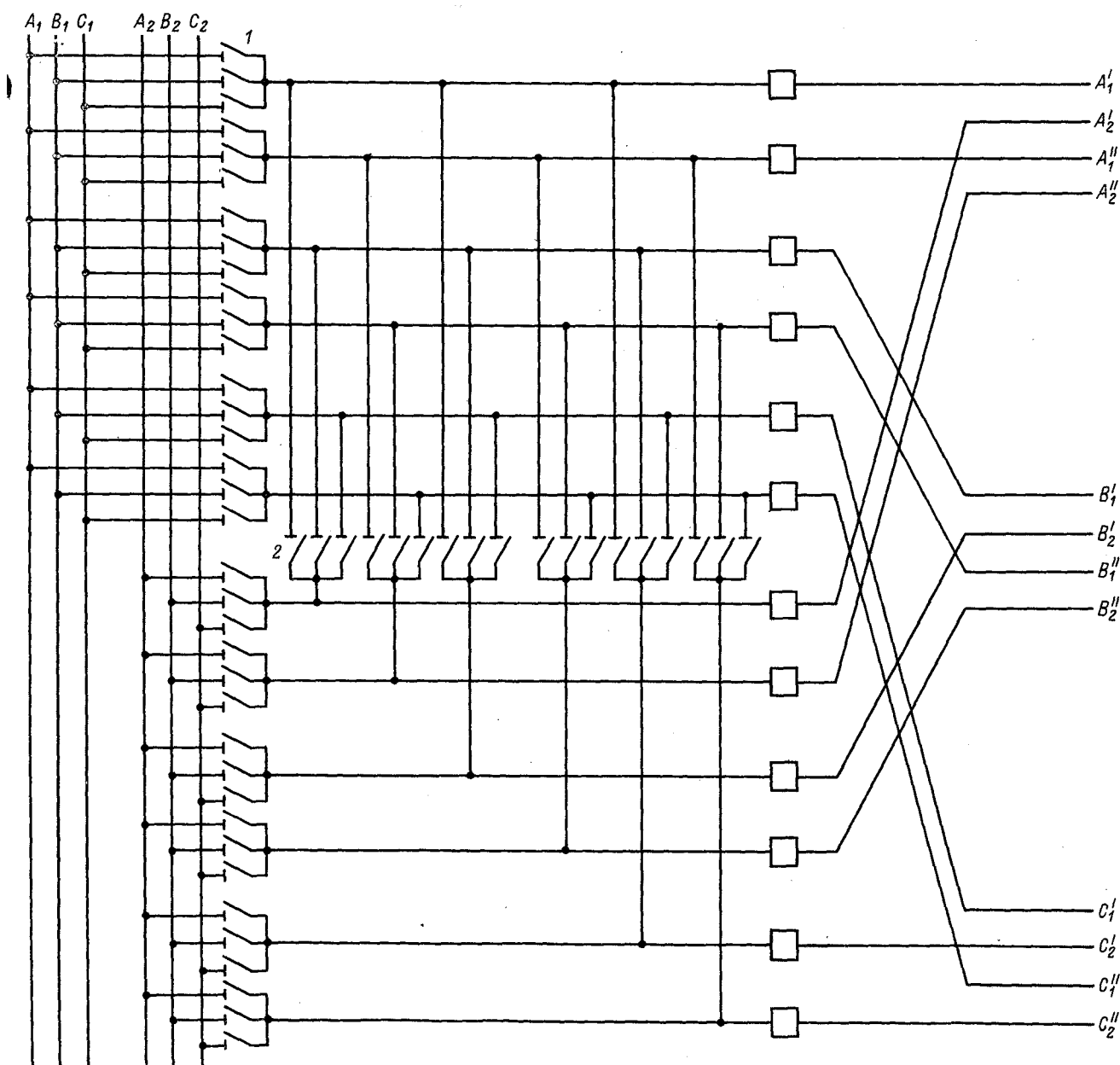


Рис. 12. Гибкая схема коммутации проводов расщепленных фаз со сдвигом векторов фаз напряжений

подключаться к любой фазе одной из систем шин, а с помощью трехпозиционных коммутационных аппаратов 2 — к другой системе шин. В результате в каждом пучке сближенных проводов (например, A'_1 , A'_2 , A''_1 , A''_2) можно получить различные сочетания дискретно изменяемого сдвига векторов фаз напряжений, прикладываемых к этим проводам. Сдвиг векторов фаз может изменяться как в нормальных режимах ВЛ при изменении ее нагрузки, так и в послеаварийных режимах при отключении части проводов.

Выводы. Приведенную классификацию не следует рассматривать как полностью охватывающую все предложенные на сегодня конструктивно-схемные решения ВЛ, как обычного, так и нетрадиционного типа. Она является первым шагом

такого рода обобщения и в дальнейшем может быть уточнена и расширена. Представляется также, что появление и распространение в технической литературе новых понятий, связанных с разработкой и созданием новых типов воздушных линий электропередачи, требует своего закрепления в соответствующих терминологических стандартах, работа над которыми ведется в настоящее время. И, наконец, начавшееся внедрение в СССР и за рубежом компактных, многофазных, управляемых и т. п. ВЛ настоятельно требует соответствующего, достаточно подробного, освещения в учебной литературе физических принципов, конструктивных особенностей, режимных характеристик и технико-экономических показателей новых типов воздушных линий электропередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / Под ред. Г. Н. Александрова. — Л.: ЛГУ, 1987.
2. Управляемые линии электропередачи / Под ред. В. А. Венникова. — Кишинев: Штиинца, 1984.
3. Лисочкина Т. В. Экономические проблемы создания воздушных линий электропередачи переменного тока сверхвысокого напряжения. — Л.: ЛГУ, 1987.
4. Тиходеев Н. Н. Передача электрической энергии. — Л.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Денисенко Г. И. Передача электрической энергии пульсирующим током. — Львов: Изд. Львовского университета, 1971.
6. Поспелов Г. Е., Федин В. Т. Электрические системы и сети. Проектирование. — Минск: Высшая школа, 1988.
7. А. с. 974481 (СССР). Воздушная линия электропередачи переменного тока / В. Х. Ишкин. — Опул. в Б. И., 1982, № 42.
8. Астахов Ю. Н., Веников В. А., Зуев Э. Н. Увеличение пропускной способности двухцепных линий электропередачи. — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1965, № 5.
9. Гершенгорн А. И. Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения. — Энергохозяйство за рубежом, 1985, № 5.
10. Поспелов Г. Е., Федин В. Т. Опыт разработки и внедрения компактных линий электропередачи. Обзорная информация, серия 44.29.37. — Минск: БелНИИТИ, 1987.
11. Глебов И. А., Бобков Ю. А., Дембо А. Р. Четырехполюсные турбогенераторы с роторами уменьшенного веса. — В кн.: Теоретические и электрофизические проблемы электроэнергетики. — Л.: Энергия, 1973.
12. А. с. 1257742 (СССР). Система электропередачи переменного тока / Е. В. Калентионюк, Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. — Опул. в Б. И., 1986, № 34.
13. Мукосеев Ю. Л. Распределение переменного тока в токопроводах. — М. — Л.: ГЭИ, 1959.

[12.04.90]

УДК 621.3:538.3

Функции Грина и интегральные уравнения плоскомеридианных полей устройств с длинными цилиндрами

МИХАЙЛОВ В. М.

Харьков

В технике высоких напряжений, сильных магнитных полей и электротермии используют устройства, элементами которых являются длинные проводящие цилиндры, с плоскомеридианными полями. Обобщенная расчетная конструкция таких устройств, показанная на рис. 1, состоит из проводящего кольца 1 произвольного меридианного сечения, внутреннего 2 и внешнего 3 проводящих цилиндров, длина которых значительно больше поперечных размеров кольца. В частных случаях один из цилиндров может отсутствовать.

Эффективным методом расчета полей в рассматриваемых устройствах является метод интегральных и интегродифференциальных уравнений. В область интегрирования известных уравнений этих типов, описывающих распределения источ-

ников поля, входят меридианные сечения цилиндров или их контуры [1,2]. Последние можно исключить с помощью решений вспомогательных краевых задач для соответствующих дифференциальных уравнений поля системы «кольцевой электрод бесконечно малого поперечного сечения — цилиндры». Такое преобразование позволяет значительно (в 2 и более раз) уменьшить порядок аппроксимирующей системы алгебраических уравнений.

Цель статьи — показать некоторые реализации изложенной идеи для электростатического поля и магнитного поля идеальных сверхпроводников, основанные на использовании функций Грина. Заметим, что в [3] с помощью функций Грина были построены интегральные уравнения электрического поля постоянного тока в проводящей среде, позволяющие исключить из области интегрирования отдельные граничные поверхности.

Функции Грина для кольцевого источника поля, расположенного соосно между двумя concentрическими цилиндрами неограниченной длины. Пусть единичный кольцевой заряд, меридианное сечение которого совпадает с точкой M , помещен в однородную изотропную линейную диэлектрическую среду с проницаемостью ϵ соосно между двумя concentрическими заземленными цилиндрами 2 и 3 неограниченной длины (рис. 1). Функция Грина электростатического поля в рассматриваемой области имеет такой вид:

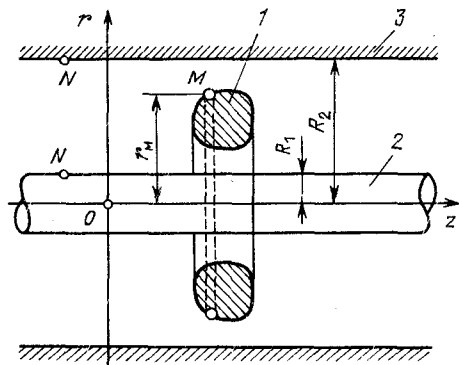


Рис. 1. Обобщенная расчетная конструкция осесимметричной системы кольцо — длинные цилиндры: 1 — кольцо; 2 — внутренний цилиндр; 3 — внешний цилиндр

$$G_{\varphi}(P, M) = \frac{1}{2\pi^2\epsilon} \left\{ \frac{K(k)k}{2\sqrt{r\rho'_M}} + \int_0^{\infty} [c_1(\lambda) \times \right.$$

$$\times [I_0(\lambda r_p) + c_2(\lambda)K_0(\lambda r_p)] \cos(\lambda|z_p - z_M|) d\lambda, \quad (1)$$

где P — точка наблюдения поля; r, z — цилиндрические координаты точек, указанных в индексах; $K(k)$ — полный эллиптический интеграл 1-го рода модуля k .

В частном случае отсутствия внутреннего цилиндра формула (1) согласуется с известной зависимостью [4].

Пусть теперь по кольцу бесконечно тонкого поперечного сечения, совпадающего с точкой M , протекает единичный ток (рис. 1). Среда между идеально сверхпроводящими цилиндрами 2 и 3 является немагнитной. Функция Грина магнитного поля в рассматриваемой области имеет такой вид:

$$G_A(P, M) = \frac{\mu_0 r_M}{\pi} \left\{ \frac{K(P, M)}{2\sqrt{r_P r_M}} + \int_0^\infty [c_1(\lambda) \times \right. \\ \left. \times I_1(\lambda r_p) + c_2(\lambda)K_1(\lambda r_p)] \cos(\lambda|z_p - z_M|) d\lambda \right\}, \quad (2)$$

где $K(P, M)$ — известная функция полных эллиптических интегралов 1-го и 2-го рода и их модуля [5].

В формулах (1), (2), вывод которых (вместе с выражениями для определения величин $C_{1,2}(\lambda)$) дан в приложении, I_ν, K_ν — модифицированные функции Бесселя 1-го и 2-го рода ν -го порядка.

Расчет электростатического поля. Пусть кольцо I имеет потенциал U_1 , а цилиндры 2, 3, заземлены (рис. 1). Распределение электрических зарядов на электродах может быть найдено с помощью интегрального уравнения 1-го рода [1]

$$\sum_{k=1}^{k=3} \int_{l_k} \sigma(M) \sqrt{r_M} K(k) k dl_M = \begin{cases} 2\pi \varepsilon U_1 \sqrt{r_P}, & P \in l_1; \\ 0, & P \in l_{2,3}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma(M)$ — поверхностная плотность электрического заряда; l_k, dl_M — контур меридианного сечения k -го электрода (при $k=2$ и 3 — образующие цилиндров) и его элемент.

С другой стороны, решение рассматриваемой задачи можно представить с помощью функции Грина

$$\varphi(P) = 2\pi \oint_{l_1} \sigma(M) r_M G_\varphi(P, M) dl_M. \quad (4)$$

Используя заданное граничное условие на кольце I , из формулы (4) получаем следующее интегральное уравнение 1-го рода:

$$\oint_{l_1} \sigma(M) r_M G_\varphi(P, M) dl_M = (2\pi)^{-1} U_1. \quad (5)$$

Область интегрирования уравнения (5), в отличие от (3), не содержит образующих цилиндров $l_{2,3}$. После решения уравнения (5) распределение зарядов на цилиндрах может быть найдено с помощью зависимости

$$\sigma(N) = \pm 2\pi \varepsilon \oint_{l_1} \sigma(M) r_M \frac{\partial G_\varphi(N, M)}{\partial r_N} \Big|_{r_N=R_N} dl_M, \quad N \in l_{2,3}. \quad (6)$$

Знак минус в формуле (6) берется при $k=1$, плюс — при $k=2$. Производная функции Грина, входящая в формулу (6) и взятая с соответствующим знаком, имеет физический смысл напряженности электрического поля, обусловленного действием единичного кольцевого заряда, а также индуктированными им зарядами на цилиндрах. В частных случаях имеем:

$$\frac{\partial G_\varphi(N, M)}{\partial r_N} \Big|_{r_N=R_N} = (-1)^{m+1} (2\pi^2 \varepsilon R_m)^{-1} \times \\ \times \int_0^\infty \frac{F_m(\lambda r_M)}{F_m(\lambda R_m)} \cos(\lambda|z_N - z_M|) d\lambda, \quad (7)$$

где $m=1$ при отсутствии внешнего цилиндра; $m=2$ при отсутствии внутреннего цилиндра; $F_1 = K_0, F_2 = I_0$.

С помощью формул (6), (7) можно преобразовать другие интегральные уравнения рассматриваемой задачи [в частности, уравнение (3)], исключив из области их интегрирования образующие цилиндров.

Расчет магнитного поля идеальных сверхпроводников. Пусть все элементы конструкции, показанной на рис. 1, являются идеальными сверхпроводниками, причем по кольцу I пропускается некоторый ток, а в цилиндрах 2 и 3 индуцируются токи. Векторный потенциал результирующего магнитного поля в пространстве между электродами определяем с помощью соответствующей функции Грина:

$$A(P) = \oint_{l_1} \eta(M) G_A(P, M) dl_M, \quad (8)$$

где $\eta(M)$ — поверхностная плотность тока.

Используя известное граничное условие на поверхности кольца I [6]

$$2\pi r_P A(P) = \Phi_0,$$

где $\Phi_0 = \text{const}$ — магнитный поток системы электродов, получаем следующее интегральное уравнение 1-го рода;

$$\oint_{l_1} \eta(M) G_A(P, M) dl_M = \frac{\Phi_0}{2\pi r_P}. \quad (9)$$

Для сравнения приведем уравнение, составленное для рассматриваемой системы проводников традиционным способом 2:

$$\sum_{k=1}^{k=3} \int_{l_k} \eta(M) K(P, M) \sqrt{r_M} dl_M = \begin{cases} \frac{\Phi_0}{\mu_0 \sqrt{r_P}}, & P \in l_1; \\ 0, & P \in l_{2,3}. \end{cases} \quad (10)$$

Сравнивая (9) и (10), нетрудно видеть, что благодаря использованию функции Грина $G_A(P, M)$ из области интегрирования уравнения (9) исключены образующие цилиндров $l_{2,3}$. После решения уравнения (9) распределение величины $\eta(M)$ на образующих цилиндрических поверхностях может быть найдено с помощью зависимости

$$\eta(N) = \pm \frac{1}{\mu_0} \oint_{l_1} \eta(M) \frac{\partial}{\partial r_N} [G_A(N, M)] \Big|_{r_N=R_N} dl_M. \quad (11)$$

Правило использования знаков в формуле (11) такое же, как и в формуле (6). Производная функция Грина, входящая в формулу (11), имеет физический смысл индукции магнитного поля на поверхности соответствующего цилиндра, обусловленного единичным кольцевым током и индуцированными им поверхностными токами на цилиндрах. Величина

$$\frac{\partial}{\partial r_N} G_A(N, M) \Big|_{r_N=R_m}, \quad m=1, 2$$

в частных случаях может быть определена по формуле (7), если в ней заменить множитель $(2\pi^2 \varepsilon R_m)^{-1}$ перед интегралом на $\mu_0 r_m (\pi R_m)^{-1}$, а в подынтегральной функции принять $F_1 = K_1$, $F_2 = I_1$. Получаемая в частном случае $m=1$ формула согласуется с известной зависимостью для поверхностной плотности тока на внутреннем цилиндре [7].

Выражение (11) можно использовать для преобразования известных интегральных уравнений с целью исключения из области интегрирования участков $l_{2,3}$. Например, уравнение (10) преобразуется к виду

$$\oint_{l_1} \eta(M) \sqrt{r_M} \left\{ K(P, M) + \frac{1}{\mu_0 \sqrt{r_M}} \sum_{k=2}^{k=3} (-1)^{k+1} \sqrt{R_k} \times \right. \\ \left. \times \int_{l_k} \frac{\partial}{\partial r_N} [G_A(N, M)] \Big|_{r_N=R_k} K(P, N) dz_N \right\} dl_M = \\ = \frac{\Phi_0}{\mu_0 \sqrt{r_P}}, \quad M, P \in l_1, \quad N \in l_k. \quad (12)$$

Аналогичным образом с помощью формулы (6) может быть преобразовано уравнение (3).

Эффективность применения интегральных уравнений, полученных с помощью функции Грина и их производных. Рассматриваемые интегральные уравнения решают численно на ЦВМ после преобразования в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Такое преобразование осуществляют на пространственной сетке, нанесенной на контур меридианного сечения кольца (число узлов N_1) и образующих цилиндров [для уравнений (3), (10), число узлов N_1]. При решении уравнения (12) сетка на образующих цилиндров (число ее узлов $N_{11} \approx N_1$) используется для вычисления определенного интеграла по переменной z_N . Порядки СЛАУ и объемы памяти ЦВМ, требуемые для решения различных интегральных уравнений, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Порядки СЛАУ и объемы памяти ЭВМ при численном решении интегральных уравнений

Интегральное уравнение	Порядок СЛАУ	Объемы памяти (число ячеек)	
		для матрицы СЛАУ	для матрицы несобственных интегралов
(3), (10) (5), (9) (12)	$N_1 + N_1$ N_1 N_1	$(N_1 + N_1)^2$ N_1^2 N_1^2	— N_1^2 $N_1 N_{11}$

В случае длинных цилиндров $N_1 \gg N_1$. Поэтому, как видно из данных табл. 1, интегральные уравнения, составленные с помощью функций Грина и их производных, приводят к СЛАУ значительно меньшего порядка и требуют соответственно значительно меньшей памяти ЦВМ.

Общее время (трудоемкость) численного решения интегрального уравнения представим в виде суммы времени, необходимого для формирования матрицы СЛАУ, и времени решения СЛАУ. Для интегральных уравнений, составленных с помощью функций Грина и их производных, первая составляющая больше из-за вычисления несобственных интегралов, а вторая — меньше, так как порядок решаемой СЛАУ для них существенно меньше (табл. 1). Соотношения соответствующих составляющих затрат времени определяют преимущество тех или иных интегральных уравнений по этому показателю.

Следует заметить, что с целью уменьшения трудоемкости формирования матрицы СЛАУ вычисление несобственных интегралов может быть оптимизировано путем применения более точных квадратурных формул (КФ), рационального выбора расчетной длины промежутка и шага интегрирования. Это позволяет сделать трудоемкость численного решения предлагаемых уравнений примерно такой же, как и известных, а в некоторых случаях меньше. Сказанное здесь иллюстрируется в приведенных ниже примерах расчета.

Об использовании функции Грина для нахождения эквивалентных зарядов и токов. Рассматриваемые задачи могут быть решены с помощью метода эквивалентных зарядов и токов [1, 8]. В этом случае необходимо ввести кольцевые источники поля, обеспечивающие выполнение заданных граничных условий на контуре кольца и образующих цилиндров. Поскольку длина цилиндров значительно больше поперечных размеров кольца, то число источников, располагаемых вдоль образующих цилиндров, должно быть достаточно большим, что значительно усложняет решение задач. При использовании функций Грина (1), (2) эквивалентные источники достаточно ввести только внутри кольца, так как граничные условия на цилиндрах выполняются автоматически. В частности, исходное уравнение для нахождения N эквивалентных токов I_k при расчете магнитного поля имеет такой вид:

$$\sum_{k=1}^{k=N} I_k(P_k) G_A(P_k, M) = \frac{\Phi_0}{2\pi r_M}, \quad (13)$$

где P_k — точка расположения k -го кольцевого источника тока в меридианной плоскости.

Примеры расчета. Рассмотрим осесимметричную систему проводников «тороид—внешний цилиндр» (рис. 2). При расчете электростатического поля полагаем, что на тороид подан потенциал U_1 , а внешний цилиндр заземлен. При расчете магнитного поля считаем тороид и внешний цилиндр идеальными сверхпроводниками, причем через тороид проходит кольцевой ток. Для аппроксимации интегральных уравнений использовали

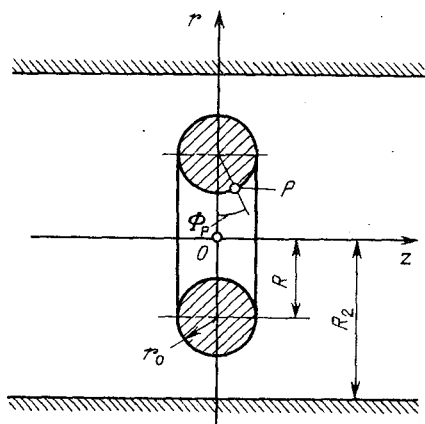


Рис. 2. Расчетная конструкция системы «тороид — внешний цилиндр»

КФ прямоугольников. Несобственные интегралы, входящие в ядра уравнений (5), (9), (12), рассчитывали с помощью КФ Симпсона (они достаточно быстро сходятся). Вычисления выполняли на ЦВМ ЕС 1033, СЛАУ решали при помощи подпрограммы SIMQ [10]. Получены устойчивые численные решения всех рассматриваемых уравнений. Результаты расчета при $N_1=41$, $N_i=N_1=50$, $l/R_2=4$ (l — расчетная длина цилиндра) даны в табл. 2. Наибольшие расхождения соответствующих данных имеют порядок 1 %.

В рассмотренном примере расчета распределения источников магнитного поля сравнивали объем памяти и трудоемкости решения различных интегральных уравнений. Величины $R/R_2=0,6$, $r_0/R_2=0,3$, $N_1=41$ оставались постоянными. Изменяли: l/R_2 ; N_i ; тип КФ, расчетную длину промежутка l_λ , шаг интегрирования h_λ , число узловых точек n_λ при вычислении несобственных интегралов (величины l_λ , h_λ являются безразмерными, базисный размер R_2). С помощью вычислительных экспериментов было определено значение $l_\lambda \approx 20$. Параметры h_λ и n_λ подбирались так, чтобы значения плотности источников поля на тороиде, получаемые при решении различных уравне-

Таблица 3
Параметры численного решения интегральных уравнений (10) (варианты 1—3) и (9) (варианты 4—6)

Вариант	l/R_2	N/l	Порядок СЛАУ	Объем памяти ЭВМ, байт	Машинное время	Вычисление несобственных интегралов
1	2	50	46	8464	48 с	—
2	4	100	71	20 164	1 мин 27 с	—
3	6	150	96	36 864	2 мин 30 с	—
4	—	—	21	3528	5 мин 30 с	КФ прямоугольников, $h_\lambda=0,1$, $n_\lambda=200$
5	—	—	»	»	1 мин 9 с	КФ Симпсона, $h_\lambda=0,8$, $n_\lambda=25$
6	—	—	»	»	46 с	КФ Чебышева, $n_\lambda=14$

ний и использовании различных КФ, во всех узловых точках отличались на величину около 1 %. Порядок СЛАУ и объем памяти определяли по формулам, приведенным в табл. 1, с учетом симметрии системы проводников и обычной точности представления чисел в ЦВМ. Трудоемкость характеризовали машинным временем ЦВМ ЕС 1033. Результаты вычислительных экспериментов приведены в табл. 3.

Трудоемкость решения известного уравнения (10) возрастает с увеличением N_i из-за необходимости расчета распределения источников поля на цилиндре большей длины или его детализации (варианты 1—3). Заметим, что увеличение расчетной длины цилиндра при $l/R_2 > 2$ практически не влияет на значения плотности источников поля на тороиде и цилиндре вблизи тороида. Использование для вычисления несобственных интегралов КФ прямоугольников, наименее точной из рассмотренных КФ, требует сильного измельчения шага интегрирования и приводит к наибольшему машинному времени (вариант 4). В этом случае трудоемкость вычисления несобственных интегралов значительно превышает экономия трудоемкости за счет уменьшения порядка СЛАУ.

Переход к более точной КФ Симпсона позволяет укрупнить шаг интегрирования и соответственно существенно уменьшить трудоемкость расчета (вариант 5). Применение самой точной из рассмотренных КФ Чебышева дает минимальное машинное время (вариант 6). При необходимости возможно дальнейшее уменьшение трудоемкости, в частности, путем уменьшения величины l_λ при вычислении части несобственных интегралов (это приводит к усложнению алгоритма решения задачи).

Трудоемкость решения уравнений (9) и (12) примерно одинакова. Это обусловлено тем, что, хотя в уравнении (9) и отсутствует интеграл по образующим цилиндров, число различных модифицированных функций Бесселя в его ядре в 2 раза больше. Уравнения (5) и (9) более удобны в том смысле, что при их решении на образующие цилиндров нет необходимости наносить сетку.

Таблица 2
Распределение источников электростатического и магнитного полей на тороиде в системе «тороид — внешний цилиндр» при $R_1/R_2=0,6$, $r_0/R_2=0,3$ (рис. 2)

φ_P	Результаты решения уравнения				
	(3)	(5)	(10)	(9)	(12)
	$\sigma R_2 (\varepsilon U_1)^{-1}$		$\eta_0 R_2^3 \Phi_0^{-1}$		
0	0,3260	0,3265	4,284	4,284	4,284
$\pi/20$	0,3636	0,3645	4,167	4,167	4,167
$\pi/10$	0,4748	0,4759	3,849	3,849	3,849
$3\pi/20$	0,6552	0,6563	3,403	3,403	3,403
$\pi/5$	0,8945	0,8959	2,901	2,900	2,900
$\pi/4$	1,182	1,184	2,415	2,414	2,414
$2\pi/5$	2,233	2,232	1,338	1,337	1,337
$\pi/2$	3,075	3,068	0,996	0,994	0,994
$3\pi/5$	4,129	4,110	0,876	0,872	0,873
$3\pi/4$	6,608	6,543	1,077	1,066	1,067
$9\pi/10$	10,57	10,40	1,648	1,621	1,624
π	12,08	11,85	1,846	1,812	1,816

Приложение. Определение функции Грина. Рассмотрим вначале получение функции $G_\varphi(P, M)$. Решение уравнения Лапласа для плоскомеридианного электростатического поля, удовлетворяющее однородным граничным условиям на поверхностях цилиндров и регулярное всюду, кроме точки M , ищем в виде

$G_\varphi(P, M) = \varphi_k(P, M) + \varphi_{\text{ц}}(P, M),$ (14)
где $\varphi_k, \varphi_{\text{ц}}$ — потенциал полей, создаваемых соответственно единичным кольцевым зарядом и индуцированными зарядами на цилиндрах.

Воспользуемся методом частных решений, непрерывно зависящих от параметра λ [9]. Первое слагаемое решения (14) представим в виде соответствующего интеграла по параметру λ , используя известное разложение в ряд величины r_{PM}^{-1} (r_{PM} — расстояние между точками P и M) [7]:

$$\varphi_k(P, M) = \frac{1}{2\pi^2\epsilon_0} \int_0^\infty K_0(\lambda r_M) I_0(\lambda r_P) \times \\ \times \cos(\lambda |z_P - z_M|) d\lambda, \quad r_P < r_M. \quad (15)$$

При $r_P > r_M$ эти величины в формуле (15) нужно поменять местами. Второе слагаемое решения (14) ищем в виде

$$\varphi_{\text{ц}}(P, M) = \int_0^\infty [M(\lambda) I_0(\lambda r_P) + N(\lambda) K_0(\lambda r_P)] \times \\ \times \cos(\lambda |z_P - z_M|) d\lambda. \quad (16)$$

Функции $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$ определяем с помощью заданных граничных условий на поверхностях цилиндров. При нахождении функции $G_A(P, M)$ решение однородного дифференциального уравнения для векторного потенциала плоскомеридианного магнитного поля, удовлетворяющее однородным граничным условиям на поверхностях сверхпроводящих цилиндров и регулярное всюду, кроме точки M , ищем в виде

$G_A(P, M) = A_k(P, M) + A_{\text{ц}}(P, M),$ (17)
где $A_k, A_{\text{ц}}$ — векторные потенциалы магнитных полей, создаваемых соответственно единичным кольцевым током и индуцированными токами на цилиндрах.

Используя метод частных решений, непрерывно зависящих от параметра λ , величины $A_k(P, M)$ и $A_{\text{ц}}(P, M)$ представим в виде интегралов, аналогичных выражениям (15) и (16). Отличие состоит в том, что порядок модифицированных функций Бесселя изменится на первый, а множитель перед интегралом в формуле (14) будет иметь вид $\mu_0 r_M \pi^{-1}$. После описанных преобразований каждая из искоемых функций Грина может быть представлена в следующем обобщенном виде:

$$G_{\varphi(A)}(P, M) = c_{\varphi(A)} \int_0^\infty \left\{ \frac{[c_1(\lambda) + K_0(\lambda r_M)]}{c_1(\lambda)} \times \right. \\ \times I_0(\lambda r_P) \Big|_{r_P < r_M} + \frac{c_2(\lambda)}{[c_2(\lambda) + I_0(\lambda r_M)]} \times K_0(\lambda r_P) \Big\} \times \\ \times \cos(\lambda |r_P - z_M|) d\lambda, \quad r_P > r_M, \quad (18)$$

где

$$c_k = F_k \frac{I_\nu(\lambda r_M) K_\nu(\lambda R_k) - I_\nu(\lambda R_k) K_\nu(\lambda r_M)}{I_\nu(\lambda R_1) K_\nu(\lambda R_2) - I_\nu(\lambda R_2) K_\nu(\lambda R_1)}, \quad k=1, 2; \quad (19)$$

$$F_1 = K_\nu(\lambda R_2), \quad F_2 = -I_\nu(\lambda R_1).$$

Частные случаи формулы (19):

а) внешний цилиндр отсутствует ($R_2 \rightarrow \infty$) при этом

$$c_1(\lambda) = 0, \quad c_2(\lambda) = -I_\nu(\lambda R_1) [K_\nu(\lambda R_1)]^{-1} K_\nu(\lambda r_M);$$

б) внутренний цилиндр отсутствует ($R_1 \rightarrow 0$) при этом

$$c_1(\lambda) = -K_\nu(\lambda R_2) [I_\nu(\lambda R_2)]^{-1} I_\nu(\lambda r_M), \quad c_2(\lambda) = 0.$$

Для функции $G_\varphi(P, M)$ необходимо принять во всех формулах $\nu=0$, а для $G_A(P, M) - \nu=1$. Кроме того, в первом случае $c_\varphi = (2\pi^2\epsilon_0)^{-1}$, во втором — $c_A = \mu_0 r_M \pi^{-1}$. Выражение (18) удобно для нахождения производных функции Грина по радиальной координате на поверхностях цилиндров. В других случаях его целесообразно преобразовать, используя другие известные выражения для величин $\varphi_k(P, M)$ и $A_k(P, M)$ через полные эллиптические интегралы [1, 5]. После таких преобразований выражение (18) переходит в формулы (1) и (2).

Выводы. 1. Получены функции Грина для кольцевых источников поля (заряда или тока), помещенных в однородную изотропную линейную среду соосно между двумя концентрическими (заземленными в случае электростатического поля или сверхпроводящими в случае магнитного поля) цилиндрами неограниченной длины.

2. С помощью полученных функций Грина их производных составлены интегральные уравнения для расчета плоскомеридианных полей устройств с длинными цилиндрами, в области интегрирования которых не входят образующие цилиндров. Это позволяет значительно уменьшить порядок аппроксимирующей системы алгебраических уравнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колечицкий Е. С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Михайлов В. М. Расчет магнитного поля при резком скин-эффекте с помощью интегральных уравнений первого рода. — Электричество, 1981, № 8.
3. Вишневский А. М. Расчет стационарного электрического поля методом интегральных уравнений. — Электричество, 1978, № 7.
4. Ярмаркин М. К. О расчете электрического поля сферических и тороидальных экранов элегазового высоковольтного оборудования. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1979, № 5.
5. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Том 2. — Л.: Энергоиздат, 1981.
6. Шнейерсон Г. А. К расчету распределения переменного тока по поверхности тел вращения при резком скин-эффекте. — ЖТФ, 1961, № 1.
7. Смайт В. Электростатика и электродинамика. — Иностранная литература, 1954.
8. Расчет электрических и магнитных полей с помощью эквивалентных зарядов и токов: Учеб. пособие / В. М. Михлов. — К.: УМК ВО, 1988.
9. Лебедев Н. Н., Скальская И. П., Уфлянд Я. С. Сборник задач по математической физике. — М.: ГИИТЛ, 1955.
10. Программирование, отладка и решение задач на ЭВМ единой серии. Язык Фортран / И. А. Кудряшов, Н. Х. Кушн Л. В. Петрова и др. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.

[24.06.

Аналитические методы расчета электромагнитных полей в многослойных средах

ОСТРЕЙКО В. Н.

Расширение использования в электротехнике и радиоэлектронике многослойных структур из ленточных, фольговых, пленочных и других материалов, создание беспазовых электрических машин, моделируемых при электромагнитных расчетах МС, а также разработка многослойных моделей электромагнитного исследования недр Земли стимулируют непрерывное развитие аналитических методов расчета полей в линейных многослойных средах (МС). Интерес к аналитическим методам расчета в данном случае в первую очередь обусловлен тем, что из-за вероятной сложности распределения поля в МС (вследствие наличия множества границ с резким изменением электромагнитных характеристик — проницаемостей и электропроводностей) при реализации численных методов расчета в каждом слое, вообще говоря, необходимо задаваться достаточно большим числом узлов (участков) аппроксимации, что может приводить к алгебраическим системам весьма высоких порядков.

Так, если при расчете двумерного поля в некоторой линейной N -слойной среде задать в каждом слое 5 узлов по толщине и 20 узлов по высоте (т. е. по 100 узлов аппроксимации в каждом слое), то уже при $N=50$ применение численного метода приведет к линейной алгебраической системе порядка, оцениваемого величиной $100 \cdot 50 = 5000$. Реализация на ЭВМ подобного алгоритма связана с определенными трудностями. В то же время при аналитическом решении рассматриваемой двумерной задачи в 50-слойной среде потребуется удовлетворить лишь внешним граничным условиям поля и двум условиям непрерывности составляющих его векторов на 49 границах раздела слоев. При совпадении границ МС с координатными поверхностями это может привести к легко решаемой на ЭВМ линейной алгебраической системе [1] порядка $2 \cdot 50 = 100$.

Об ограниченных возможностях численных методов расчета электромагнитных полей в МС свидетельствует и ряд работ. Например, в [А2] указано, что при расчете высококачественного поля в пакете тонконесущих шин необходимо разбивать их сечения на участки аппроксимации не только по высоте, но и по толщине. Однако последнее приводит к увеличению порядка системы алгебраических уравнений почти в 10 раз и, как следствие, — к практической невозможности ее решения [2]. Для преодоления этой трудности в [2] предложено в численном алгоритме значительную долю информации преобразовывать в аналитическом виде. В качестве следующего примера укажем на работу [3], посвященную исследованию шихтованного стального электромагнитного экрана. В ней для преодо-

ления выше отмеченной трудности принято допущение о неизменности напряженности магнитного поля по толщине листов стали, а также осуществлено приближенное моделирование реальной МС экрана средой с небольшим числом слоев.

Таким образом, достаточно точный расчет с помощью численных методов даже двумерных полей в линейных МС может быть сильно затруднен. В то же время при геометрическом соответствии всех границ МС некоторой системе координат (например, прямоугольной или цилиндрической) удастся найти сравнительно легко реализуемый на ЭВМ аналитический расчетный алгоритм [1].

Для выбора наиболее рационального метода решения той или иной задачи расчета электромагнитного поля в МС необходимо иметь хотя бы общие представления о процедуре, возможностях и ограничениях каждого из разработанных аналитических методов. Поэтому целью настоящей статьи является рассмотрение аналитических методов на основе предлагаемой их классификации. Эта классификация отражает два принципиально различных подхода к расчету полей в МС.

Первый подход основан на отыскании решения уравнений поля в виде единой функции, относящейся ко всей области МС.

Второй подход (классический) основан на послойном решении уравнений поля и, следовательно, описании поля в N -слойной среде совокупностью N функций.

Методы, соответствующие первому подходу, могут быть подразделены на две группы. К первой группе отнесем методы, основанные на решении дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, отражающими реальные различия электромагнитных характеристик слоев. Ко второй группе отнесем методы, основанные на решении дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, соответствующими некоторым осредненным электромагнитным характеристикам линейной МС, что эквивалентно ее однородно-анизотропному моделированию [1].

Методы первой группы [4, 5] основаны или на учете границ раздела слоев с помощью разрывных функций [4], или на автоматическом обеспечении на этих границах условий непрерывности поля, что достигается путем введения специальной координаты среды [5, 41]. В обоих случаях поле описывается сложными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами, для которых удастся найти лишь некоторые приближенные решения [4, 5].

Основу методов второй группы, которые по своей сути являются приближенными, составляют осредненные (эквивалентные) электромагнитные характеристики МС. Обзор методов определения этих характеристик имеется, например, в [1]. Число прикладных работ, использующих осредненные характеристики, велико [1], что обусловлено радикальным упрощением электромагнитных расчетов при однородно-анизотропном моделировании МС. Однако такое моделирование может приводить к значительным погрешностям расчетов [1, 6].

Методы, соответствующие второму подходу, также могут быть подразделены на две группы, которые условимся называть третьей и четвертой. К третьей группе отнесем методы, основанные на представлении решений уравнений поля в слоях через собственные функции координаты, изменяющейся поперек слоев. К четвертой группе отнесем методы, основанные на представлении решений уравнений поля в слоях через собственные функции координаты, изменяющейся вдоль границ слоев.

Общая теория методов третьей группы [7—9] разработана Г. А. Гринбергом [7]. Сущность этой теории заключается в описании поля в каждом слое среды с помощью системы собственных функций координаты, изменяющейся поперек границ раздела слоев и обеспечивающей удовлетворение условиям непрерывности поля. При этом различным слоям соответствуют и разные системы собственных функций, однако характеристические числа являются общими для всех систем.

Недостаток методов третьей группы заключается в необходимости определения характеристических чисел из сложного трансцендентного уравнения. Именно по этой причине данные методы не нашли широкого практического применения.

Сущность методов четвертой группы заключается в описании поля в каждом слое среды с помощью единой системы собственных функций координаты, изменяющейся вдоль границ раздела слоев. При этом все многообразие разработанных методов по существу определяется различиями в алгоритмах удовлетворения условиям непрерывности поля (т. е. различиями в учете границ раздела слоев). Характерно, что указанные алгоритмы соответствуют методам линейного анализа. Именно поэтому методы четвертой группы нашли самое широкое применение в практике исследования полей в МС.

В зависимости от способа учета границ раздела слоев в четвертой группе выделим десять основных методов, которым можно дать следующие названия: метод графов [10, 11]; метод длинных линий [12, 13]; метод вспомогательных функций [14—17]; метод вторичных источников [18]; метод геометрической оптики [19—21]; метод эквивалентного экранирования [22—24]; метод возмущений [25, 26]; метод импедансов [27—29]; метод четырех-

полюсников [19, 30—34]; метод алгебраических уравнений (классический метод).

Эти методы составляют основной арсенал аналитического исследования различных полей и процессов в МС.

Метод графов заключается в решении уравнений поля с помощью теории графов. Такое решение дает наглядную картину проникновения поля в МС и обычно приводит к рекуррентным алгоритмам расчета. Однако возможность применения метода графов относится к случаям плоской электромагнитной волны, падающей на слои неограниченной протяженности.

Метод длинных линий основан на описании распределения поля между границами раздела слоев в соответствии с моделью длинной линии. Такой прием существенно упрощает расчеты. Однако его применение в основном ограничено специальными задачами анализа растекания тока (многослойные конденсаторы, заземлители и т. п.).

Сущность метода вспомогательных функций заключается в представлении решения уравнений поля в слоях в виде несобственных интегралов от некоторых функций, удовлетворяющих условиям непрерывности поля. При этом указанные функции определяются или аналитически из рекуррентных соотношений или численно из интегральных уравнений. Данные методы в основном применимы в случае слоев неограниченной протяженности.

В методе вторичных источников учет границ раздела слоев осуществляется с помощью соответствующего распределения поверхностных источников поля (например, зарядов), определяемого из интегральных уравнений. Иногда эти уравнения могут быть разрешены аналитически [18].

Метод геометрической оптики основан на аналогиях с прохождением луча света через МС. При этом замкнутый или рекуррентный расчетный алгоритм получается с помощью коэффициентов отражения (реакции) и экранирования (прохождения). Применение данного метода в основном относится к плоским электромагнитным волнам, падающим на слои неограниченной протяженности.

Метод эквивалентного экранирования фактически представляет собой обобщенный (и поэтому лишенный наглядности) вариант метода геометрической оптики. Он также основан на получении рекуррентных алгоритмов для эквивалентных коэффициентов отражения и экранирования МС. Однако эти коэффициенты уже относятся к сложному электромагнитному полю, обусловленному заданной системой токов.

Метод возмущений основан на первоначальном описании поля заданных токов в предположении абсолютной прозрачности примыкающих к ним МС (невозмущенное поле). После этого с помощью известных эквивалентных коэффициентов отражения и экранирования МС (возмущающего фактора) определяется и соответствующее возмущенное электромагнитное поле.

Метод импедансов основан на отыскании ре-

куррентных соотношений для эквивалентных импедансов МС. Их использование позволяет решать электромагнитные задачи только в области одного слоя, где сосредоточены источники поля (токи). При этом влияние прилегающих МС учитывается с помощью импедансных граничных условий.

Сущность метода четырехполюсников заключается в моделировании каждого слоя среды электрическим четырехполюсником. В результате этого МС представляется в виде каскадного соединения четырехполюсников, а расчет электромагнитного поля в ней сводится к перемножению соответствующих матриц. Если отвлечься от указанного электрического моделирования среды, то данный метод можно назвать также и матричным. Тогда в обобщенном варианте [33, 34] его сущность заключается в представлении поля в каждом слое с помощью некоторой матрицы, причем так, что при расчете поля в МС эти матрицы перемножаются.

Метод алгебраических уравнений относится к разряду классических. Он основан на отыскании постоянных интегрирования, входящих в решения уравнений поля в слоях, из системы линейных алгебраических уравнений. Эта система является следствием удовлетворения условиям непрерывности поля [1].

Отметим, что в отдельных работах предложены методы, представляющие собой ту или иную комбинацию из рассмотренных методов четвертой группы. Это, например, относится к методу [35], который по существу объединяет в себе метод геометрической оптики и метод импедансов.

Из десяти рассмотренных методов четвертой группы наибольшей общностью характеризуются методы эквивалентного экранирования, возмущений, импедансов, четырехполюсников и алгебраических уравнений. Однако методы эквивалентного экранирования, возмущений и импедансов, как основанные на рекуррентных соотношениях, могут быть применены лишь в тех случаях, когда в подавляющем большинстве слоев среды поле удовлетворяет однородным дифференциальным уравнениям и граничные условия на общих для всех слоев границах рассматриваемой области также однородны [1]. Эти случаи являются и наиболее благоприятными для применения метода четырехполюсников.

В общем же случае (т. е. при неоднородных уравнениях или неоднородных граничных условиях) МС моделируется совокупностью не пассивных, а активных четырехполюсников, что существенно усложняет процедуру расчета поля. Кроме того, элементы матриц четырехполюсников в цепной модели МС, как правило, отличаются на несколько порядков. Поэтому при перемножении таких матриц в соответствии со схемой каскадного соединения четырехполюсников может происходить значительная потеря точности [36]. Вместе с тем, при решении специальных задач, например теории электрических машин, использование метода четырехполюсников является предпочтительным [32], так как сама эта теория основана на цепных моделях.

Наиболее общим и универсальным методом в четвертой группе является метод алгебраических уравнений. Он одинаково применим к полям, удовлетворяющим как однородным, так и неоднородным уравнениям и граничным условиям [1]. Этот метод адекватен и полевой постановке электромагнитных задач, так как непосредственно относится к определению постоянных интегрирования в решениях уравнений поля и не требует искусственного введения дополнительных параметров и понятий. Соответствующая ему алгебраическая система порядка $2N$ легко записывается и программируется на ЭВМ в матричной форме для общего случая N -слойной среды [1]. Если же в большинстве слоев уравнения поля и граничные условия однородны, то зачастую может быть получено высокоэффективное рекуррентное решение этой системы [37, 38]. Более того, существует простой способ [39], позволяющий в самом общем случае понизить порядок $2N$ алгебраической системы до $N-1$ и затем записать ее рекуррентное решение с помощью метода прогонки [40].

Высокую эффективность указанного способа понижения порядка алгебраической системы и ее рекуррентного решения иллюстрируют следующие данные, рассчитанные на ЭВМ СМ-1:

Алгоритм	$A(2N)$	$A(N-1)$	$A(P)$	$A(2N)$	$A(N-1)$	$A(P)$
t_m, c	56,9	69,9	31,1	111,5	143	71,4
N_m	182	560	580	102	300	320

Здесь: R — разрядность счета, равная 6 и 12; $A(2N)$ — исходный алгоритм расчета постоянных интегрирования для векторного потенциала в N -слойной модели из [39], представляющий собой приведенную в [39] алгебраическую систему (12) порядка $2N$; $A(N-1)$ — алгоритм расчета постоянных интегрирования, модернизированный в [39] в алгебраическую систему (16), (17) порядка $N-1$; $A(P)$ — рекуррентный алгоритм расчета постоянных интегрирования по методу прогонки [40]; t_m — максимальное время расчета постоянных интегрирования, соответствующее максимально возможному по памяти ЭВМ СМ-1 числу слоев $N=N_m$ (для всех трех алгоритмов зависимость времени счета t от N близка к линейной $T=t_m N/N_m$).

Согласно вышеприведенным данным алгоритм $A(N-1)$ по сравнению с $A(2N)$ примерно втрое расширяет возможности расчета полей в МС (по предельному числу слоев N_m). При этом время счета t_m для втрое большего N_m возрастает всего лишь в 1,25 раза, т. е. для одного и того же N время счета t уменьшается в 2,4 раза (алгебраические системы в обоих алгоритмах решались стандартным методом отражений, учитывающим ленточный вид матриц). Рекуррентный же алгоритм $A(P)$ по сравнению с $A(2N)$ характеризуется еще более высокими показателями, поскольку обеспечивает не только дальнейшее увеличение числа N_m (в 3,2 раза), но и уменьшение примерно в 1,7 раза соответствующего времени счета t_m (т. е. для одного и того же N время счета уменьшается в 5,4 раза).

Отметим, что при значительных различиях электромагнитных характеристик соприкасающихся слоев матрица алгебраической системы содержит элементы, отличающиеся на несколько порядков. Однако при использовании локальных координат [1, 39] вследствие устойчивости расчетного алгоритма эти отличия не будут приводить к потере точности. Данный вывод подтвердили и расчеты, выполненные по трем алгоритмам $A(2N)$, $A(N-1)$, $A(P)$ с разрядностью 6 и 12 (все шесть результатов этих расчетов совпали в пяти первых цифрах).

Выводы. 1. Из всего многообразия аналитических методов расчета полей в N -слойной среде наибольшей общностью и универсальностью все же характеризуется классический метод, основанный на послышном решении дифференциальных уравнений поля и определении постоянных интегрирования из линейной алгебраической системы порядка $2N$, обеспечивающей выполнение условий непрерывности поля на границах раздела слоев.

2. Существует общий способ, позволяющий понизить порядок алгебраической системы $2N$ до $N-1$ и записать ее высокоэффективное рекуррентное решение. Это решение примерно в 5 раз сокращает время счета и в 3 раза увеличивает максимальное число слоев N , для которого на данной ЭВМ могут быть осуществлены расчеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Острейко В. Н. Расчет электромагнитных полей в многослойных средах.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1981.— 151 с.
2. Тозони О. В., Руденко Л. В. О расчете мощных токовых повышающей частоты.— Электричество, 1979, № 2, с. 40—43.
3. Нахамкин А. М., Рубингаут А. М. Исследование шихтованного ферромагнитного экрана криогенной электрической машины.— Электричество, 1980, № 6, с. 24—30.
4. Боев В. М. Метод расчета магнитного поля электрической машины с использованием разрывных функций.— Изв. вузов. Энергетика, 1983, № 1, с. 36—42.
5. Острейко В. Н. Решение уравнений электромагнитного поля в многослойных средах методом разделения суммируемых дифференциальных операторов.— В кн.: Электромеханические преобразователи и устройства / Сев.-Зап. заочн. политехнич. ин-т.— Л.: Ден. рукопись.— М.: Информэлектро, 1982, № 311 эт — Д82, с. 70—85.
6. Ерышов Н. М. Модификация метода многократных отражений в задаче прохождения волн через слоистые неоднородные среды.— Радиотехника и электроника, 1981, т. XXVI, № 3, с. 457—462.
7. Гринберг Г. А. О решении уравнений математической физики с частично или полностью разделяющимися переменными.— В кн.: Сборник, посвященный семидесятилетию академика А. Ф. Иоффе.— М., 1950, с. 50—60.
8. Титко А. И., Счастливый Г. Г. Математическое и физическое моделирование переменного тока.— Киев: Наукова думка, 1976.— 200 с.
9. Инкин А. И. Аналитическое решение уравнений магнитного поля в дискретных структурах явнопольных электрических машин.— Электричество, 1979, № 8, с. 18—21.
10. О расчете теплового радиоизлучения многослойных структур методом ориентированных графов с применением ЭВМ/М. Д. Раев, Е. А. Шарков, Т. А. Ширяева, В. С. Эткин.— Радиотехника и электроника, 1975, т. XX, вып. 3, с. 632—635.
11. Покровский Ю. А., Афромеєв В. И. Математические модели в инженерном анализе волноводно-диэлектрических структур с плоскими слоями.— Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1982, т. XXV, № 3, с. 58—60.
12. Карякин Р. Н., Добрынин В. К. Входное сопротивление протяженного вертикального заземлителя в многослойной земле.— Электричество, 1975, № 8, с. 18—21.
13. Нетушил А. В., Ермуратский П. В. Об учете сопротивления обкладок конденсаторов.— Электричество, 1980, № 9, с. 70—71.
14. Тихонов А. Н., Шахсуваров Д. Н. Метод расчета электромагнитных полей, возбуждаемых переменным током в слоистых средах.— Изв. АН СССР. Сер. Геофизическая, 1956, № 3, с. 245—251.
15. Дмитриев В. И. Общий метод расчета электромагнитного поля в слоистой среде.— В кн.: Вычислительные методы и программирование.— М.: 1968, вып. 10, с. 55—65.
16. Семенов В. И. Расчет индуктивностей плоских проводников в слоистых средах.— Радиотехника, 1976, т. 31, № 5, с. 85—89.
17. Чебышев В. В. Алгоритм расчета полоскового вибратора в слоисто-однородной среде.— Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1981, т. XXIV, № 9, с. 3—10.
18. Гринберг Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений.— М.— Л.: Изд-во АН СССР, 1948.— 727 с.
19. Постников И. М., Безусый Л. Г. Расчет бегущего электромагнитного поля в многослойных средах.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1970, № 6, с. 92—99.
20. Гроднев И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот.— М.: Связь, 1972.— 111 с.
21. Ослон А. Б., Станкеєва И. Н. Применение оптической аналогии к расчету электрических полей в многослойных средах.— Электричество, 1977, № 11, с. 77—79.
22. Иванов С. А. Экранирование вращающегося электромагнитного поля многослойным цилиндрическим экраном.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1978, № 6, с. 91—98.
23. Ружинский Л. Н. Расчет характеристик однослойных и многослойных цилиндрических экранов безубоковых синхронных генераторов.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1979, № 3, с. 64—74.
24. Ружинский Л. Н., Грубой А. П. Расчет электромагнитного поля в многослойных средах.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1980, № 5, с. 85—95.
25. Талышинский И. Т. Метод исследования электрических машин на основе теории отражения электромагнитных волн.— Электричество, 1982, № 1, с. 24—28.
26. Талышинский И. Т., Новоцадовский И. Г. Расчет индуктивных сопротивлений синхронной машины с экранами.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1982, № 5, с. 84—92.
27. Тихонов А. Н., Шахсуваров Д. Н. О возможности использования импеданса естественного электромагнитного поля Земли для изучения ее верхних слоев.— Изв. АН СССР. Сер. геофизическая, 1956, № 4, с. 410—418.
28. Кравченко А. Н., Химюк И. В. Исследование импеданса и удельных поверхностных потерь многослойных цилиндрических проводящих структур в бегущем электромагнитном поле.— В кн.: Проблемы технической электродинамики.— Киев: 1973, вып. 44, с. 65—70.
29. Кравченко А. Н., Нижник Л. П. Электродинамические расчеты в электротехнике.— Киев: Техника, 1977.— 182 с.
30. Юринов В. М. Применение аналоговых цепных схем для расчета электромагнитных полей.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1974, № 6, с. 77—82.
31. Инкин А. И. Схемная аппроксимация линейных сред, находящихся под воздействием электромагнитного поля.— Электричество, 1975, № 4, с. 64—67.
32. Инкин А. И., Литвинов Б. В. Синтез каскадных схем замещения индукционных электрических машин на базе типовых Е—Н четырехполюсников.— Электротехника, 1977, № 1, с. 29—34.
33. Молотков Л. А. О применении матричного метода к исследованию процессов распространения в слоистых средах.— В кн.: Вычислительные методы в геофизике.— М.: 1981, с. 91—101.
34. Абрамов К. К., Баловленков Е. В. Расчет многослойных электромагнитных экранов.— Радиотехника, 1982, т. 37, № 10, с. 76—79.
35. Dulla J. Riesenie elektromagnetickeho pola pri specialnych okrajovych podmienkach.— Prace a studie Vysokej skoly dopravnej v Ziline. Seria elektrotechnicka, 1979, с. 6, 11—22.

36. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. — М.: Мир, 1980. — 279 с.
37. Данилевич Я. Б., Яковлев В. И. Эквивалентные магнитные свойства крайних пакетов сердечника статора. — В кн.: Методы расчета турбо- и гидрогенераторов. — Л.: 1975, с. 59—67.
38. Расчет квазистационарного магнитного поля в многослойных средах при токовой системе возбуждения произвольного вида / Ю. Н. Белоусов, Е. Ф. Макаров, А. В. Череватый, Г. Д. Шнырев. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1985, № 4. с. 150—154.

39. Острейко В. Н. О понижении порядка систем алгебраических уравнений при расчетах полей в многослойных средах. — Изв. вузов. Электромеханика, 1984, № 7, с. 11—15.
40. Острейко В. Н. О приведении матриц к трехдиагональному виду при расчетах полей в многослойных средах. — Изв. вузов. Электромеханика, 1985, № 5, с. 107.
41. Острейко В. Н. Уравнения, обеспечивающие автоматическое удовлетворение условия непрерывности двумерного поля в слоистой среде. — Техническая электродинамика, 1986, № 1, с. 14—19.

[09.10.90]

УДК 621.372.061.001.24

Достаточное условие единственности стационарного режима для одного класса нелинейных электрических цепей

КОЛЕВ Л. В.

София, Болгария

Проблема единственности стационарного режима, устанавливающегося в неавтономных нелинейных электрических цепях, исследовалась в ряде работ [1—10]. Полученные к настоящему времени результаты отличаются как степенью общности рассматриваемых классов нелинейных цепей, так и степенью эффективности соответствующих критериев единственности установившегося режима.

В некоторых случаях критерий единственности удается сформулировать в виде соответствующего необходимого и достаточного условия. Так, например, доказано [4, 5, 7], что при периодических воздействиях одного и того же периода, RLC -цепь, состоящая из линейных реактивных элементов и нелинейных резисторов с монотонными характеристиками, всегда имеет один единственный стационарный режим.

В других случаях (обычно для более широкого класса цепей) критерий единственности формулируется только в виде соответствующего достаточного условия. Критерий такого типа был получен в [8] (теорема 2, 3) для RLC -цепи, состоящей из нелинейных R -, L - и C -элементов с монотонными характеристиками и подверженной воздействию источников напряжения и тока с произвольными по форме, но равномерно ограниченными сигналами. Этот критерий был улучшен в [9, 10]. Дополнительное улучшение эффективности рассматриваемого критерия единственности возможно в частном случае, когда все участвующие резисторы линейны и образуют взаимный многополюсник (теорема 4.1 из [8]). Однако, как показывают числовые примеры из [8], даже для вышеупомянутого частного случая получаемые по соответствующему критерию [(4, 1)] из [8] оценки о соотношениях между параметрами участвующих в рассматриваемой цепи элементов, гарантирующих единственность установившегося режима, являются довольно консервативными (заниженными). Так, в примере

5.1 из [8] при варьируемом сопротивлении R_2 (рис. 1) единственность периодического режима гарантируется на основе критерия (4.1) только в том случае, если $R_2 \leq 60$ Ом, в то время как эксперименты показали, что режим единствен вплоть до $R_2 = 1,6$ кОм.

В настоящей статье предлагается новый критерий единственности стационарного режима в электрических цепях с нелинейными R -, L -, C -элементами; в отличие от [8—10] он не основывается непосредственно на втором методе Ляпунова, а базируется на одном результате относительно свойства конвергентности [11—14] определенного класса нелинейных систем. По степени общности этот критерий занимает промежуточное положение по сравнению с ранее известными критериями для указанного класса цепей — его область применения уже, чем теорема 2.3 и шире, чем теорема 4.1 из [8].

Предлагаемый в статье критерий единственности основывается на теореме 69 из [11] и в наиболее общей формулировке применим в тех случаях, когда уравнения цепи можно записать в следующем виде:

$$\dot{x}_i = g_i(x_1, \dots, x_n) + s_i(t), \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

или в векторной форме:

$$\dot{x} = g(x) + s(t), \quad (1a)$$

где \dot{x}_i означает производную по времени x_i .

Предполагается, что правые части (1) заданы при всех x_1, \dots, x_n , t , вещественны и непрерывны;

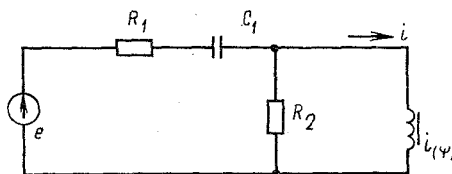


Рис. 1

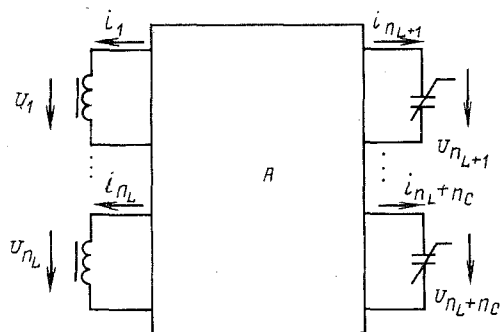


Рис. 2

кроме того, все функции $s_i(t)$ произвольной формы ограничены по модулю, т. е. $|s_i(t)| \leq c$.

Известно [5], что при определенных условиях уравнения электрической цепи, состоящей из нелинейных резисторов и нелинейных реактивных элементов, можно записать в виде системы (1), если в качестве x_i выбрать потокосцепление ψ_j j -й катушки и заряд q_k k -го конденсатора.

Для конкретности укажем на следующие два случая.

Случай 1. Цепь состоит из n_L нелинейных катушек, n_C нелинейных конденсаторов, линейных резисторов, зависимых и независимых источников напряжения и тока. Ее можно представить в виде $2n$ ($n = n_L + n_C$) линейного активного резистивного многополюсника A , на входы которого подключены двуполусные нелинейные реактивные элементы (рис. 2).

Введем (временно) вектор переменных состояния

$$y = \begin{pmatrix} i_L \\ u_C \end{pmatrix} \quad (2)$$

и вектор сопряженных переменных

$$z = \begin{pmatrix} u_L \\ i_C \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где u_L , u_C , i_L , i_C — векторы-столбцы, компонентами которых являются соответствующие напряжения и токи.

Предполагается, что выполнены следующие допущения относительно исследуемой электрической цепи:

а) активный многополюсник A допускает относительно z и y гибридное описание

$$z = Hy + s(t), \quad (4)$$

где H — $(n \times n)$ постоянная матрица, а $s(t)$ — n -мерный вектор источников;

б) нелинейные реактивные элементы имеют монотонные характеристики, т. е.

$$i_k = f_k(\psi_k), \quad k = 1, \dots, n_L \quad (5)$$

и существуют положительные константы L_{0k} и L_{1k} такие, что

$$\frac{1}{L_{0k}} \leq \frac{f_k(\psi_k') - f_k(\psi_k)}{\psi_k' - \psi_k} \leq \frac{1}{L_{1k}} \quad (6)$$

для произвольных ψ_k' , ψ_k , $k = 1, \dots, n_L$; аналогичным образом

$$u_k = f_k(q_k), \quad k = n_L + 1, \dots, n \quad (7)$$

и существуют положительные константы C_{0k} и C_{1k} такие, что

$$\frac{1}{C_{0k}} \leq \frac{f_k(q_k') - f_k(q_k)}{q_k' - q_k} \leq \frac{1}{C_{1k}} \quad (8)$$

для произвольных q_k' , q_k .

Введем новые переменные состояния ψ_j , $j = 1, \dots, n_L$ и q_k , $k = n_L + 1, \dots, n$, образующие вектор-столбец

$$x = \begin{pmatrix} \psi \\ q \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где ψ и q — векторы-столбцы соответствующей длины.

С помощью векторов x и y запишем функции (5) и (7) в векторной форме как

$$y = f(x), \quad (10)$$

где, очевидно $f_i(x) = f_i(x_i)$. Теперь легко убедиться, что уравнения исследуемой цепи можно записать в виде

$$\dot{x} = Hf(x) + s(t), \quad (11)$$

т. е. в виде (1а), если x определяется формулой (9), т. е. если в качестве переменных выбраны потокосцепления нелинейных катушек и заряды нелинейных конденсаторов. В данном случае

$$g(x) = Hf(x). \quad (12)$$

Доказательство следует непосредственно из описания (4), (10) и того обстоятельства, что

$$z = \dot{x}, \quad (13)$$

так как

$$\left. \begin{aligned} u_k &= \psi_k, \quad k = 1, \dots, n_L; \\ i_k &= \dot{q}_k, \quad k = n_L + 1, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Этот результат можно обобщить на следующий частный случай нелинейной цепи, содержащей и нелинейные резисторы.

Случай 2. В данном случае предполагается, что дополнительно приняты следующие допущения:

а) все нелинейные двуполусные резисторы цепи включены последовательно с нелинейными катушками и параллельно с нелинейными конденсаторами;

б) все нелинейные резисторы R_k , включенные последовательно с нелинейными катушками, управляемы по току, т. е.

$$u_{R_k} = f_{R_k}(i_k), \quad k = 1, \dots, n_L; \quad (15)$$

в) все нелинейные резисторы R_k , включенные параллельно с нелинейными конденсаторами, управляемы по напряжению, т. е.

$$i_{R_k} = f_{R_k}(u_{R_k}), \quad k = n_L + 1, \dots, n. \quad (16)$$

Введем следующий вектор-столбец:

$$f_R = \begin{pmatrix} u_R \\ i_R \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где u_R и i_R — векторы-столбцы, чьи элементы определяются по формулам (15) и (16) соответственно.

Из (2), (10), (15) и (16) следует, что

$$f_R = f_R[f(x)]. \quad (18)$$

Теперь легко показать, что уравнения цепи можно записать в виде

$$\dot{x} = Hf(x) - f_R[f(x)] + s(t), \quad (19)$$

т. е. в виде (1а), причем

$$g(x) = Hf(x) - f_R[f(x)]. \quad (20)$$

Действительно, в данном случае на основании допущений (15) и (16) и формулы (17) можно записать

$$z = \begin{pmatrix} u_L + u_R \\ i_C + i_R \end{pmatrix},$$

что эквивалентно:

$$z = \dot{x} + f_R,$$

откуда, учитывая (4) и (18), вытекает (19).

Следует подчеркнуть, что более общие случаи вывода уравнений цепи в виде (1) (с учетом возможных вырождений) рассмотрены в [5]. Рассмотренные здесь два случая приведены лишь для большей ясности изложения.

Так как в литературе по нелинейным цепям и системам в термин конвергентность вкладывается разный смысл [4, 5, 11—13], то приведем следующее наиболее общее определение [13]: если система уравнений (1) имеет единственное ограниченное решение, асимптотически устойчивое в целом, то цепь, описываемая системой (1), называется конвергентной.

Перейдем теперь к нахождению конкретных достаточных условий для того, чтобы цепь, описываемая системой (11) или (19), была конвергентной.

Сначала рассмотрим случай системы (11). Пусть

$$s(0) = Hf(0).$$

Положим

$$\left. \begin{aligned} g'(x) &= Hf(x) - s(0); \\ s'(t) &= s(t) + s(0). \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Выделим из функции $g'(x)$ член, линейный относительно x . Для этой цели представим $f(x)$ в следующем виде:

$$f(x) = f(0) + \alpha x + f'(x), \quad (22)$$

где, учитывая, что $f_i(x) = f_i(x_i)$, α — диагональная постоянная $(n \times n)$ матрица.

Элементы α_k матрицы α целесообразно выбрать следующим образом:

$$\alpha_k = (\alpha_{0k} + \alpha_{1k})/2, \quad k = 1, \dots, n, \quad (23)$$

где

$$\alpha_{0k} = 1/L_{0k}, \quad \alpha_{1k} = 1/L_{1k}, \quad k = 1, \dots, n_L; \quad (24)$$

$$\alpha_{0k} = 1/C_{0k}, \quad \alpha_{1k} = 1/C_{1k}, \quad k = n_L + 1, \dots, n. \quad (24a)$$

Тогда $g'(x)$ можно записать в виде

$$g'(x) = Wx + h(x), \quad (25)$$

где постоянная матрица W определяется как

$$W = H\alpha, \quad (26)$$

а

$$h(x) = g'(x) - Wx. \quad (27)$$

В новых обозначениях система (11) примет вид

$$\dot{x} = Wx + h(x) + s'(t). \quad (28)$$

Обозначим через $Y = \{y_{ij}(t)\}$ матрицу фундаментальной системы решений однородной системы уравнений

$$\dot{x} = Wx. \quad (29)$$

Столбцы матрицы Y являются решениями (29) при начальных условиях $Y(0) = E$, где E — единичная матрица. Пусть вещественные части собственных чисел λ_i матрицы W отрицательны, т. е.

$$\lambda_m < 0, \quad \lambda_m = \max [\operatorname{Re}(\lambda_i)], \quad (30)$$

а λ — некоторая отрицательная постоянная, удовлетворяющая неравенству

$$\lambda > \lambda_m. \quad (30a)$$

Введем матрица $M = \{m_{ij}\}$, чьи элементы определяются следующим образом:

$$m_{ij} = \sup [y_{ij}(t - \tau) e^{-\lambda(t - \tau)}] \quad (31)$$

при $0 < \tau < t, t > 0$.

Пусть α_0 — диагональная матрица, чьи элементы α_{0k} определяются формулами (24) и (24a).

Введем диагональную матрицу

$$\alpha' = \alpha - \alpha_0 \quad (32)$$

с элементами α'_i . По способу определения $f'(x)$ из (22), очевидно справедливы неравенства

$$|f'_i(x'_i) - f'_i(x_i)| \leq \alpha'_i |x'_i - x_i|, \quad i = 1, \dots, n. \quad (33)$$

Тогда из (27) и (33) следует, что функции $h_i(x_1, \dots, x_n)$ [элементы $h(x)$] удовлетворяют неравенствам

$$\begin{aligned} |h_i(x'_1, \dots, x'_n) - h_i(x_1, \dots, x_n)| &= \\ &= \left| \sum_{j=1}^n H_{ij} [f'_j(x'_j) - f'_j(x_j)] \right| \leq \sum_{j=1}^n b_{ij} |x'_j - x_j|, \\ & \quad i = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (34)$$

где

$$b_{ij} = |H_{ij}| \alpha'_j. \quad (35)$$

С помощью (35) введем $(n \times n)$ матрицу $B = \{b_{ij}\}$, а затем и $(n \times n)$ матрицу

$$C = M \cdot B. \quad (36)$$

Пусть μ — наибольшая вещественная часть собственных чисел μ_i матрицы C , т. е.

$$\mu = \max_i [\operatorname{Re}(\mu_i)] \quad (37)$$

Теперь можно сформулировать основной результат настоящей работы.

Теорема 1. Пусть исследуемая цепь, содержащая нелинейные реактивные элементы и удовлетворяющая допущениям случая 1, описана системой уравнений (28). Если выполняется условие

$$\mu < |\lambda|, \quad (38)$$

где μ и λ определяются соответственно по (37), (30) и (30а), то цепь конвергентна.

Доказательство следует непосредственно из теоремы 69 [11].

Полученный результат можно обобщить на случай нелинейной цепи, описанной системой уравнений (19). Пусть

$$\left. \begin{aligned} s(0) &= Hf(0) - f_R(f(0)); \\ \bar{g}(x) &= Hf(x) - f_R(f(x)) - s(0); \\ \bar{s}(t) &= s(t) + s(0). \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Выделим снова из $f_R(f(x))$ линейный относительно x член, т. е. представим f_R в виде

$$f_R[f(x)] = \bar{H}x + h'(x), \quad (40)$$

где \bar{H} — постоянная матрица.

Учитывая (22), представим (39) в виде, аналогичном (25):

$$\bar{g}(x) = \bar{W}x + \bar{h}(x) + \bar{s}(t), \quad (41)$$

где

$$\bar{W} = H\alpha - \bar{H}; \quad (42)$$

$$\bar{h}(x) = Hf'(x) - h'(x). \quad (43)$$

В этих обозначениях система (19) примет вид

$$\dot{x} = \bar{W}x + \bar{h}(x) + \bar{s}(t). \quad (44)$$

Прибавим к допущениям случая 2 следующие условия.

Предположение 2г. Характеристики (15) и (16) нелинейных резисторов, от которых зависят функции $f_R[f(x)]$ таковы, что функции $\bar{h}_i(x_1, \dots, x_n)$ [элементы введенной с помощью (43) векторной функции \bar{h}] обладают следующим свойством:

$$|\bar{h}_i(x'_1, \dots, x'_n) - \bar{h}_i(x_1, \dots, x_n)| \leq \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij} |x'_j - x_j|, \quad (45)$$

$$i = 1, \dots, n,$$

где \bar{b}_{ij} — неотрицательные постоянные, а x'_j, x_j — произвольные значения аргументов.

Следует особо подчеркнуть, что соблюдение условия (45) возможно и в том случае, если нелинейные резисторы цепи имеют немонотонные характеристики.

По аналогии с предыдущим случаем введем фундаментальную матрицу $\bar{Y} = \{\bar{y}_{ij}(t)\}$ однородной системы уравнений

$$\dot{x} = \bar{W}x. \quad (46)$$

Пусть снова λ_m — наибольшая вещественная часть собственных чисел λ_i матрицы \bar{W} , а $\bar{\lambda} > \lambda_m$ — некоторая отрицательная постоянная. Образует матрицу $\bar{M} = \{\bar{m}_{ij}\}$:

$$\bar{m}_{ij} = \sup [\bar{y}_{ij}(t - \tau) e^{-\bar{\lambda}(t - \tau)}] \quad (47)$$

при $0 < \tau < t$, $t > 0$, матрицу $\bar{B} = \{\bar{b}_{ij}\}$ и матрицу

$$\bar{C} = \bar{M} \cdot \bar{B}. \quad (48)$$

Пусть $\bar{\mu}$ — наибольшая вещественная часть собственных чисел матрицы \bar{C} .

Тогда на основании теоремы 69 из [11] справедлив следующий результат.

Теорема 2. Пусть исследуемая цепь, содержащая нелинейные резисторные и реактивные элементы и удовлетворяющая предположениям 1 и предположениям 2а—2г случая 2, описана системой (44). Если выполняется условие

$$\bar{\mu} < |\bar{\lambda}|, \quad (49)$$

где $\bar{\mu}$ и $\bar{\lambda}$ определяются собственными числами с наибольшей вещественной частью соответственно матрицы \bar{C} и матрицы \bar{W} , то цепь конвергентна.

Изложенный критерий единственности стационарного режима остается в силе и для общего случая, когда уравнения исследуемой цепи можно записать одним или другим способом в аддитивной форме (1).

Для иллюстрации эффективности предположенного достаточного условия существования единственного стационарного режима в нелинейных цепях рассмотренного класса рассмотрим пример 5.1 из [8]. Схема исследуемой цепи приведена на рис. 1, а на рис. 3 приведена характеристика нелинейного индуктивного элемента. Электродвижущая сила является синусоидальной $e = e_m \cos(2\pi ft)$, $e_m = 5000$ В, $f = 50$ Гц. Параметры R_1 и C_1 фиксированы: $R_1 = 50$ Ом, $C_1 = 1,69$ мкФ.

Нелинейная характеристика $i(\psi)$ имеет линейный участок (рис. 3):

$$i(\psi) = \begin{cases} \psi/L_0, & |\psi| \leq \psi_0; \\ (\psi - \psi_1)/L_1, & \psi > \psi_0; \\ (\psi + \psi_1)/L_1, & \psi < -\psi_0, \end{cases}$$

где $\psi_1 = \psi_0(1 - L_1/L_0)$, $\alpha_0 = 1/L_0$, $\alpha_1 = 1/L_1$, $L_0 = 33,33$ Гн, $L_1 = 1,28$ Гн и $\psi_0 = 0,92$ Вб.

Сопротивление R_2 переменное. На основании теоремы 4.1 в [8] получено следующее условие, гарантирующее единственность периодического режима с периодом $T = 0,02$ с:

$$\frac{R_1}{R_2} > \frac{1}{4} (1 - \sqrt{L_1/L_0}) (\sqrt{L_0/L_1} - 1). \quad (50)$$

Для удовлетворения условия (50) при выбранных значениях параметров C_1 , L_0 , L_1 и R_1 сопротивление R_2 не должно превышать предельное значение $R_{2np} = 60$ Ом.

Теперь для анализа единственности периодического режима в рассматриваемой цепи применим теорему 1 настоящей работы. Для этой цели условие (38) необходимо проверять последова-

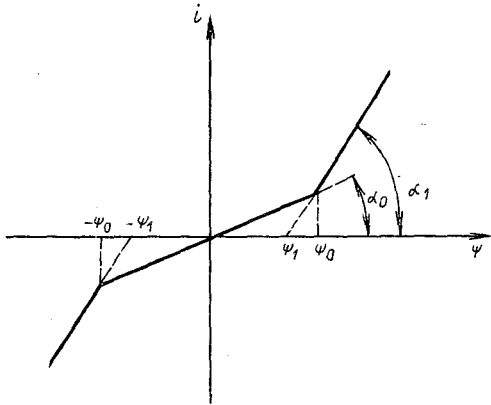


Рис. 3

тельно при различных значениях R_2 до первого его нарушения.

Система уравнений (11) для исследуемой цепи имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= -\gamma R_1 i(\psi) - \frac{\gamma}{C_1} q + \gamma e; \\ \frac{dq}{dt} &= \left(1 - \frac{\gamma R_1}{R_2}\right) i(\psi) - \frac{\gamma}{R_2 C_1} q + \frac{\gamma}{R_2} e, \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

где q — заряд на конденсаторе;

$$\gamma = 1/(1 + R_1/R_2). \quad (52)$$

Как видно из (51) и (52) элементы матрицы

$$H = \begin{bmatrix} -\gamma R_1 & -\frac{\gamma}{C_1} \\ 1 - \frac{\gamma R_1}{R_2} & -\frac{\gamma}{R_2 C_1} \end{bmatrix} \quad (53)$$

зависят от R_2 , поэтому и элементы матриц W и M зависят также от R_2 . Так как в данной цепи имеется только один нелинейный индуктивный элемент, то матрица α будет иметь вид

$$\alpha = \begin{bmatrix} \tilde{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где $\tilde{\alpha} = (\alpha_0 + \alpha_1)/2$.

Такой же вид имеет и матрица

$$\alpha' = \begin{bmatrix} \tilde{\alpha}' & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где $\tilde{\alpha}' = \alpha - \alpha_0$.

Матрица W вычисляется по формуле (26), а элементы матрицы B — по (35). Потом по (30) находится λ_m и принимается приближенно $\lambda = \lambda_m$. Теперь определяется фундаментальная система решений системы (29) и соответствующая матрица M . Наконец, по формуле (36) вычисляется матрица C и по (37) соответствующее число μ .

Приведем значения λ и μ для условия (38), полученные при различных значениях сопротивления R_2 :

R , Ом	60	100	200	300
λ	-22	-40,86	-84	-130,4
μ	20,55	38,02	79,7	147

Как видно из приведенных данных условие (38) удовлетворяется в первых трех случаях и нарушается в последнем случае, когда $R_2 = 300$ Ом. Поэтому расчет был повторен при меньшем значении R_2 . При $R_2 = 240$ Ом было получено $\lambda = -101,6$, $\mu = 98,4$ и, следовательно, условие (38) выполнено и для этого значения R_2 . Принимая приближенно (с определенным запасом), что предельное значение $R_{2пр} = 240$ Ом и сравнивая с ранее указанным предельным значением $R_{2пр} = 60$ Ом, убеждаемся в том, что новое достаточное условие (38) теоремы 1 настоящей работы приводит к значительно лучшей оценке (для рассматриваемого примера в 4 раза) области допустимых изменений параметров исследуемой цепи, внутри которой гарантируется единственность стационарного режима, по сравнению с теоремой 4.1 из [8].

Выводы. 1. Рассмотрена задача нахождения достаточного условия единственности стационарного режима для широкого класса нелинейных электрических цепей. Этот класс цепей характеризуется тем, что в системе уравнений, описывающей цепь, входные воздействия участвуют аддитивно [см. (1)].

2. Получено достаточное условие единственности стационарного режима в нелинейных цепях рассматриваемого класса [см. (38) теоремы 1 и (49) теоремы 2]. Сфера применимости теоремы 1 шире, чем теоремы 4.1 из [8], так как в отличие от [8] здесь охвачены цепи с зависимыми источниками.

3. На конкретном примере показано, что в рамках рассматриваемого класса цепей эффективность предложенного критерия единственности стационарного режима может в отдельных случаях многократно (для рассматриваемого примера в 4 раза) превышать эффективность известных из литературы критериев единственности режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синицкий Л. А. О периодическом режиме электрической цепи, содержащей нелинейные сопротивления. — Автоматический контроль и измерительная техника, 1960, № 4. — Киев: Изд. АН УССР.
2. Синицкий Л. А., Шумков Ю. М. О единственности периодического режима в нелинейных электрических цепях. — Тр. третьей конференции по нелинейным колебаниям. Берлин, 1966.
3. Хьюз Дж. Нелинейные электрические цепи. — М.: Энергия, 1967.
4. Данилов Л. В. Анализ цепей с нелинейными R-элементами. — М.: Энергия, 1974.
5. Синицкий Л. А. Элементы качественной теории нелинейных цепей. — Львов: Вища школа, 1975.
6. Chua L. O., Green D. N. A qualitative analysis of the behavior of dynamic nonlinear networks: steady-state solutions of nonautonomous networks. — IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1976, vol. 23.
7. Chua L. O. Dynamic nonlinear networks: state-of-the-art. — IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1980, vol. 27.
8. Hasler M. J., Verburgh P. On the uniqueness of the steady state for nonlinear circuits with time-dependent sources. — IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1984, vol. 31.
9. Wyatt J. L. Alternate conditions for uniqueness of the steady state in nonlinear circuits with time-dependent sources. — IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1985, vol. 32.

10. Hasler M. J. Comments on „Alternate conditions for uniqueness of the steady state in nonlinear circuits with time-dependent sources“. — IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1985, vol. 32.

11. Зубов В. И. Математические методы исследования систем автоматического регулирования. — Л.: Машиностроение, 1974.

12. Плисс В. А. Нелокальные проблемы теории колебаний. — М.: Наука, 1964.

13. Демидович В. П. Лекции по математической теории устойчивости. — М.: Наука, 1967.

14. Красносельский М. А., Лифшиц Е. А., Соболев А. В. Позитивные линейные системы. — М.: Наука, 1985.

[05.12.90]

УДК 621.315.616.9:537

Влияние электрического поля на процесс увлажнения электрической изоляции

КАНИСКИН В. А., канд. техн. наук

Ленинградский государственный технический университет

Электротехнические и радиоэлектронные изделия при хранении, обработке и в процессе эксплуатации находятся в контакте с влажной окружающей средой (атмосферная влага, грунтовые воды, водная среда рек, озер и т. п.). Многие электроизоляционные материалы этих изделий являются гигроскопичными и влагопроницаемыми. Их увлажнение оказывает сильное воздействие на физико-механические и электроизоляционные свойства, как правило, сильно ухудшая их.

Огромное количество работ посвящено увлажнению полимеров. Многие из них используются в качестве электрической изоляции и эксплуатируются в электрическом поле. Однако влияние электрического поля на процессы увлажнения остается неясным, что требует дополнительных исследований. Прежде чем перейти к рассмотрению воздействия электрического поля на процессы увлажнения диэлектриков, кратко рассмотрим их увлажнение без воздействия поля.

Увлажнение полимерных материалов без воздействия электрического поля. Подробное описание влияния влаги на эксплуатационные свойства изоляционных полимерных материалов приведено в [1—5]. Гигроскопичность материалов очень сильно зависит от размеров и количества пор в материале, в которые проникает вода. Эффективный диаметр молекулы воды составляет примерно 2,6 Å, поэтому она может проникать в поры материала, так как внутримолекулярные, межмолекулярные, капиллярные и другие поры имеют размеры на 1—3 порядка больше диаметра молекулы воды.

Для неорганических материалов характерна неактивированная сорбция влаги, при которой образуется тонкая пленка воды на поверхности крупных пор и капиллярная конденсация воды в открытых мелких порах радиусом порядка 10^{-7} см. При этом давление паров воды в капилляре над мениском меньше, чем над плоской поверхностью воды, потому вода движется по капилляру.

Сорбция влаги органическими материалами — активированная диффузия. Молекулы высокомо-

лекулярных материалов и их части совершают тепловые колебания около центров равновесия в широком диапазоне частот (до 10^{12} Гц). Благодаря этим колебаниям цепей и сегментов макромолекул возникают «дырки», в которые попадают молекулы воды. По теории Я. И. Френкеля молекулы воды, захваченные «дырками», колеблются до тех пор, пока не образуются новые «дырки», куда они и передвигаются. Переход молекулы воды из одного закрепленного состояния в другое требует затрат тепловой энергии — энергия активации.

Перенос паров воды через органические высокомолекулярные материалы характеризуется указанными ниже влажностными параметрами [1].

При стационарном процессе — коэффициентом влагопроницаемости P :

$$P = \frac{Qd}{\Delta p St},$$

где Q — количество влаги, прошедшей через пластину площадью S и толщиной d за время t при перепаде Δp на влажной и сухой сторонах пластины.

Значения упругости водяных паров, под действием которой происходит процесс влагопроницаемости функции температуры при 100 %-ной относительной влажности приведены ниже [1]:

$t, ^\circ\text{C}$	—10	—5	0	5	10
Δp , мм рт. ст.	2	3	4,6	6,5	9,2
Δp , Па	267	400	615	875	1230
	20	30	40	50	60
Δp , мм рт. ст.	17,5	31,8	55,3	92,6	149
Δp , Па	2340	4250	7400	12350	19900

При нестационарном процессе перенос воды характеризуется коэффициентом диффузии $D = d^2/6t_3$ (где t_3 — время запаздывания на за-

висимости давления паров воды на сухой стороне образца от времени) и коэффициентом растворимости воды в материале $h = P/D$.

Знание влажностных характеристик P , D и h , которые непосредственно связаны со структурой и составом материала, позволяет характеризовать процессы сорбции влаги и ее проникновение в материал.

Сорбционная влага в полимерном материале оказывает существенное влияние на его электрические свойства, так как она сама обладает высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \approx 81$) и высокой электропроводностью. Ниже приведены значения удельной электропроводности предельно чистой воды, перегнанной в вакууме, в зависимости от температуры [2]:

$T, ^\circ\text{C}$	0	10	18	26	34	50
$\gamma \times 10^8, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	1,58	2,85	4,4	6,7	9,6	18,9

Сорбционная влага увеличивает электропроводность, поляризацию и потери энергии и снижает электрическую прочность электроизоляционных материалов [8].

Увлажнение полимеров в однородном электрическом поле. В теоретических основах электротехники дано представление и описано поведение диэлектриков в электрическом поле. Для оценки увлажнения полимерной изоляции в электрическом поле остановимся на работах [6, 7] и воспользуемся следующим представлением. Заменим совокупности реальных, очень сложных молекул диэлектрика равнозначными им диполями. Это правомерно, так как любая, в целом нейтральная, система зарядов, электрический момент которой равен m , эквивалентна диполью того же момента m как в активном, так и в пассивном отношении, т. е. как в отношении возбуждаемого ею поля, так и в отношении испытываемых ею сил [7]. Это облегчит рассмотрение поведения электроизоляционных материалов в электрическом поле. Молекула воды, являясь сильно полярным диэлектриком, сама представляет собой диполь.

В электрическом поле на диполь действует сила внешнего электрического поля E и момент этих сил стремится повернуть диполь в электрическом поле так, чтобы его момент был параллелен электрическому полю, т. е. происходит поляризация диэлектрика.

Объемные пондермоторные силы электрического поля (ПСЭП) — механические силы, движущие весомые тела, — можно свести к поверхностным силам натяжения [6, 7]. Некоторый объем диэлектрика в электрическом поле (рис. 1) испытывает тягу T (натяжение) [7]. По направлению электрического поля E объем диэлектрика испытывает положительную тягу (растяжение)

$$T = + \frac{\epsilon + \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} \tau}{8\pi} E^2,$$

а по направлению, перпендикулярному электрическому полю, объем диэлектрика испытывает отрицательную тягу (давление):

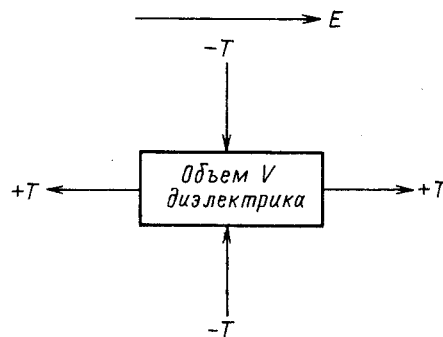


Рис. 1. Вырезанный элемент диэлектрика объемом V в электрическом поле

$$T = - \frac{\epsilon - \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} \tau}{8\pi} E^2,$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость вещества; τ — плотность среды; E — напряженность электрического поля.

Таким образом, на твердый диэлектрик действуют тяга и давление, которые вызывают упругие силы, возникающие при деформации в электрическом поле. Тяга и давление стремятся деформировать сферическую форму жидкого диэлектрика (воды), превратить ее в эллипсоид или в цилиндрическую форму, вытянутую в направлении силовых линий электрического поля.

В однородном электрическом поле (стационарном или переменном) сумма приложенных к каждому диполью ПСЭП равна нулю. Можно считать, что ПСЭП в однородном поле не оказывают прямого влияния на движение молекул воды в электроизоляционных материалах, т. е. не влияют непосредственно на сорбцию влаги, поэтому сорбция будет идти по своим кинетическим закономерностям: благодаря перепаду давлений и активированной диффузии в органических полимерах.

Однако однородное электрическое поле, особенно с ростом напряженности, не только увеличивает подвижность носителей зарядов, но и вызывает дополнительную диссоциацию молекул воды. При наличии солей, а в атмосферной пыли и в грунтовых водах они всегда имеются, усиливается процесс гидратации. Эти процессы приводят к росту электропроводности полимеров в однородном электрическом поле, хотя сами ПСЭП не влияют на сорбцию влаги, т. е. однородное электрическое поле оказывает косвенное влияние.

Таким образом, само однородное электрическое поле, а не ПСЭП, увеличивает сорбцию влаги электроизоляционными материалами. Необходимо считать, что этот процесс требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Увлажнение полимеров в неоднородном электрическом поле. В большинстве реальных конструкций электрической изоляции, если не принимаются специальные конструктивные решения, изоляция работает в условиях неоднородного электрического поля. Это можно продемонстрировать на примере силовых электрических кабелей: изоляция работает в осесимметричном (или так называемом

радиальном) поле в одножильных или пофазно экранированных кабелях и в более неоднородном поле в многожильных пофазно неэкранированных кабелях.

В неоднородном электрическом поле сумма сил, приложенных к каждому диполю, не равна нулю. В неоднородном поле плотность ПСЭП f направлена в сторону возрастания абсолютной величины вектора напряженности электрического поля E независимо от направления этого вектора (при постоянном или переменном напряжении), т. е. при изменении направления электрического поля диполь все равно будет увлекаться в сторону возрастания электрического поля [7]. Причина заключается в том, что при изменении направления вектора E изменяется также и направление поляризации диэлектрика. Таким образом, в электрическом поле диполь (диэлектрик) увлекается в область наибольшего значения напряженности поля.

Плотность ПСЭП, полученная при изменении энергии электрического поля и связанная с бесконечно малым виртуальным перемещением тел (диэлектриков) в электрическом поле, может быть определена по следующему соотношению [7]:

$$f = \rho E - \frac{1}{8\pi} E^2 \operatorname{grad} \varepsilon + \frac{1}{8\pi} \operatorname{grad} \left(E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \right), \quad (1)$$

где ρ — объемная плотность электричества.

Введем обозначения: f (1) — первое слагаемое формулы (1) — силы, действующие на свободные электрические заряды; f (2) — второе и третье слагаемые формулы (1) — силы, действующие на диэлектрик в электрическом поле, так как они не равны нулю, ими пренебрегать нельзя. Часто слагаемые формулы (1) группируют по другому, и тогда рассматривают следующие силы: максвелловы силы, действующие на диэлектрик в электрическом поле,

$$f' = \rho E - \frac{1}{8\pi} E^2 \operatorname{grad} \varepsilon \quad (2)$$

и стрикционные силы, действующие на диэлектрик в электрическом поле,

$$f'' = \frac{1}{8\pi} \operatorname{grad} \left(E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \right). \quad (3)$$

В твердых и жидких диэлектриках сила f'' сравнима по величине с f' без f (1), поэтому силой f'' пренебрегать нельзя.

Если нас интересует не распределение ПСЭП по объему произвольного тела, а только равнодействующая этих сил F и их момент, то можно ограничиться рассмотрением только максвелловых сил f' (2) и, соответственно, максвелловых натяжений T' , пренебрегая стрикционными силами f'' и натяжением T'' , при условии, что тело окружено либо вакуумом, либо диэлектрической средой, находящейся в механическом равновесии [7].

Таким образом, воспользовавшись этим выводом, можно представить полимерную изоляцию в электрическом поле, находящуюся в механическом равновесии, и передвижение воды в этой

изоляции. В неоднородном электрическом поле молекулы воды будут увлекаться в область наибольшего значения напряженности поля. Если в исходном состоянии устройства электрическая изоляция представлена в «сухом» виде (ненасыщена влагой), то ПСЭП будут суммироваться с обычными силами сорбции влаги в полимерах, ускоряя процесс переноса воды.

Ориентировочно оценим величину ПСЭП на примере одножильного силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Одножильный кабель с осесимметричным полем представляет собой цилиндрическую емкость. Если между токопроводящей жилой и оболочкой поддерживается постоянное напряжение, то под действием силы F между жилой и оболочкой изменение расстояния на dr приведет к изменению энергии W цилиндрической емкости:

$$dW = F dr,$$

$$\text{где } W = \frac{1}{2} CU^2, \text{ тогда } F = \frac{\partial W}{\partial r} = \frac{(\partial CU^2)}{2\partial r} = \frac{U^2}{2} \frac{\partial C}{\partial r}$$

С учетом цилиндрической емкости и вектора смещения получим формулу для силы:

$$F = DE\pi l r \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4)$$

и удельного давления:

$$P_{уд} = \frac{F}{S} = \frac{DE \ln \frac{r_2}{r_1}}{2}, \quad (5)$$

где $S = 2\pi r l$.

Для опытных образцов кабелей переменного тока с изоляцией из СПЭ имеет конструктивные соотношения: при 110 кВ $d_2/d_1 \approx 1,9$, а при 220 кВ $d_2/d_1 \approx 2,9$, где d_1 и d_2 — диаметры кабеля по внутреннему экрану и изоляции соответственно. Выбираем для расчета рабочую напряженность электрического поля $E_p = 10$ кВ/мм; для воды имеем $\varepsilon_1 = 81$, а для СПЭ $\varepsilon_2 = 2,3$. Локальные напряженности электрического поля во включениях, заполненных водой, и в СПЭ будут разные, соответственно и удельные давления они будут испытывать различные.

Форму включения, заполненного водой, можно рассматривать как сферическую. Тогда локальные напряженности поля можно определить по следующим зависимостям [8]: в воде

$$E_{1\text{ сф}} = \frac{3E_p \varepsilon_2}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2};$$

в СПЭ

$$E_{2\text{ сф}} = \frac{3E_p \varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

Однако, учитывая влияние электрического поля на диэлектрик и соответствующие силы (тягу и давление), наиболее вероятной формой включения

ния будет цилиндрическая. Тогда локальную напряженность электрического поля можно оценить по следующим зависимостям [8]:

в воде

$$E_{1u} = \frac{2E_p \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2};$$

в СПЭ

$$E_{2u} = \frac{2E_p \epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}.$$

Определив по этим формулам величины локальных напряженностей электрического поля, можно оценить удельные давления ПСЭП на диэлектрик по зависимости (5).

Значения локальных напряженностей электрического поля в воде E_1 и в СПЭ E_2 и удельных давлений соответственно во включениях в виде сферы или цилиндра при $E_p = 10$ МВ/м будут следующие: $E_{1сф} = 0,42$ МВ/м, $E_{2сф} = 14,8$ МВ/м; $P_{уд1сф} = 70$ Па, $P_{уд2сф} = 2370$ Па, $E_{1ц} = 0,55$ МВ/м, $E_{2ц} = 19,4$ МВ/м, $P_{уд1ц} = 120$ Па, $P_{уд2ц} = 4100$ Па.

Как видно из этих данных, твердый диэлектрик будет испытывать значительно большие удельные давления, но они будут уравниваться упругими силами диэлектрика, так как он находится в равновесии. Молекулы воды будут испытывать меньшие удельные давления, но они будут складываться с упругими силами водяных паров и ускорять процесс проникновения влаги в изоляцию. По мере насыщения изоляции влагой перепад давления за счет упругости водяных паров будет снижаться, в то время как удельные давления ПСЭП будут оставаться не зависящими от насыщения изоляции влагой. При этом в неоднородном поле при постоянном напряжении удельное давление ПСЭП будет постоянным и будет постепенно возрастать по мере проникновения молекул воды в области большей неоднородности электрического поля. При переменном напряжении удельные давления будут иметь динамический характер; их амплитуда также будет увеличиваться по мере втягивания молекул воды в область большей неоднородности поля.

В случае появления локальных неоднородностей электрического поля (заусенцы, риски на токопроводящих частях, проводящие частицы или загрязнения в изоляции и т. п. существенно возрастут локальные напряженности поля и, соответственно, удельные давления ПСЭП, что ускорит процесс сорбции влаги изоляционным полимерным материалом.

Водные тринги в полимерной изоляции. В настоящее время этому вопросу уделяется большое внимание в отечественной и зарубежной технике [9—15]. При проникновении воды в электрическую изоляцию в ней возникают водные тринги (ВТ), которые при своем развитии приводят к существенному снижению ресурса изоляции; при этом в отличие от электрических трингов при развитии ВТ отсутствуют частичные разряды, поэтому их трудно обнаружить. Однако после некоторого времени эксплуатации электрических кабелей с полимерной изоляцией ВТ

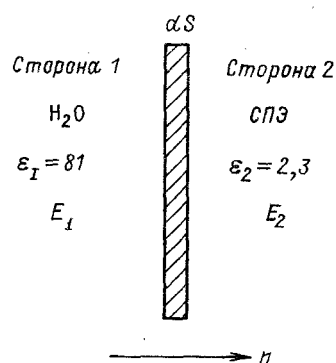


Рис. 2. Граница раздела между локально накопленной влагой и полимером — СПЭ

можно обнаружить после микроскопических исследований срезов этой изоляции. По ВТ еще мало накоплено экспериментальных данных, отсутствует теория, объясняющая закономерности зарождения развития ВТ. При описании ВТ можно выделить следующие стадии: увлажнение изоляции; зарождение ВТ; развитие ВТ; ухудшение электрических свойств полимерной изоляции; переход ВТ в канал пробоя и пробой электрической изоляции.

Увлажнение электрической изоляции может произойти за счет: грубых дефектов в металлической оболочке кабелей или в результате влагопроницаемости полимерной оболочки; в процессе сшивки полиэтилена в атмосфере водяных паров; образования воды и микропустот при разложении избытка продуктов сшивки полиэтилена, например, дегидратации кумилалкоголя, образующегося в результате разложения перекиси дикумила [15].

Первая стадия ВТ (увлажнение полимерной изоляции) рассмотрена нами ранее. Рассмотрим вторую стадию — зарождение ВТ. Зарождение и развитие ВТ происходит тогда, когда уже произошло локальное накопление влаги в полимерной изоляции, например, у токопроводящей жилы, во включениях, в месте расположения водорастворимых примесей и т. п. При этом экспериментально установлено, что ограниченное количество локально накопленной влаги может привести к тому, что после зарождения и развития ВТ влаги не хватает, он переходит в электрический тринг, который продолжает развиваться в полимерной изоляции и завершается пробоем.

Существует несколько причин зарождения и развития ВТ в полимерной изоляции, отмеченных в [12—14]:

1. Возникновение механических повреждений, которые являются следствием диэлектрофореза, развивающегося в местах сильного электрического поля.

2. Изменение химического потенциала при наложении электрического поля, что вызывает концентрацию воды в местах с высокой напряженностью электрического поля, давление воды на полимер и его разрушение.

В этих предположениях особую роль играет электрическое поле. Рассмотрим влияние ПСЭП на процессы зарождения и развития ВТ; при

этом уже предполагается, что произошло локальное накопление воды в полимере. Для рассмотрения воспользуемся выводом: общая сила F , действующая на произвольный участок среды V , определяется состоянием поля на границах этого участка, т. е. может быть сведена к системе сил и натяжений, приложенных к его поверхности.

Используя математическое описание [7], рассмотрим границу раздела между локально накопленной влагой и полимером (рис. 2). Напряженности электрического поля в воде E_1 и в СПЭ E_2 можно определить, зная среднее значение макроскопического поля в диэлектрике. Граница раздела (элемент dS) будет испытывать со стороны 1 силу

$$T'_{1n} dS = -\frac{\epsilon_1 \epsilon_0}{8\pi} (2E_{1n}E_1 - E_{1n}^2) ds,$$

где T' — максвеллов тензор; E_{1n} — нормальная составляющая напряженности электрического поля в среде 1.

Полученная сила не совпадает с выбранным направлением нормали n , поэтому она имеет отрицательную величину.

Элемент dS со стороны 2 испытывает силу

$$T'_{2n} dS = +\frac{\epsilon_2 \epsilon_0}{8\pi} (2E_{2n}E_2 - E_{2n}^2) dS.$$

Она положительна, так как совпадает с направлением нормали. Общая сила, действующая на границу раздела между водой и полимером (элемент dS)

$$f' dS = (T'_{1n} + T'_{2n}) dS = \frac{1}{4\pi} (D_{2n}E_2 - D_{1n}E_1) dS - \\ - \frac{1}{8\pi} (D_2E_2 - D_1E_1) dSn.$$

При переходе к предельно тонкому слою границы раздела, т. е. к поверхности раздела, получим общую силу:

$$f' = \frac{1}{4\pi} (D_{2n}E_2 - D_{1n}E_1) - \frac{1}{8\pi} (D_2E_2 - D_1E_1)n, \quad (6)$$

где E_1 , D_1 и E_2 , D_2 — значения векторов E и D с внутренней (сторона 1) и внешней (сторона 2) части поверхности раздела.

Используя это же математическое описание, рассмотрим случай изменения направления приложенного электрического поля на противоположный (например, в следующий полупериод при переменном напряжении). Тогда с учетом того, что $E_2 > E_1$, сила будет иметь отрицательный знак, следовательно, с изменением направления электрического поля сила будет действовать все время с одной и той же стороны, т. е. со стороны диэлектрика с большей величиной диэлектрической проницаемости ϵ_1 (вода) на диэлектрик с малой величиной ϵ_2 (СПЭ). Для случая, когда поверхность не является поверхностью разрыва, т. е. $\epsilon_1 = \epsilon_2$, имеем $E_1 = E_2$ и $D_1 = D_2$, а сила f' стремится к нулю.

Таким образом, на границе раздела между водой и полимером при переменном напряжении будет действовать динамическая сила каждый полупериод, т. е. частота приложения динамической нагрузки в 2 раза выше частоты приложения внешнего поля; при этом динамическая сила будет направлена на границу раздела всегда со стороны воды на полимер, независимо от направления электрического поля. При постоянном напряжении на полимер будет действовать статическая нагрузка.

Оценим ориентировочно силы, возникающие на границе раздела воды и СПЭ, по зависимости (6); при этом локальные напряженности электрического поля будем оценивать как для сферической, так и цилиндрической формы включения. При экспериментальном исследовании ВТ искусственные углубления в полимере — «водные иглы» выбирают обычно с радиусом закругления 2–3 мкм и более (они моделируют заусенцы на токопроводящей жиле, микропустоты и другие дефекты в полимере). Максимальная напряженность электрического поля E_{\max} на кончике иглы, вычисленная по соотношению для полубесконечного гиперболоида вращения, при исследовании ВТ может быть в пределах от 300 до 600 МВ/м [10]. Ниже приведены значения локальных напряженностей электрического поля в воде E_1 и в СПЭ E_2 и удельных давлений во включениях в виде сферы или цилиндра при двух значениях $E_{\max} = 400$ и 550 МВ/м:

при $E_{\max} = 400$ МВ/м;
 $E_{1\text{сф}} = 16,8$ МВ/м, $E_{2\text{сф}} = 590$ МВ/м, $f'_{\text{сф}} = 0,28$ МПа, $E_{1\text{ц}} = 22$ МВ/м, $E_{2\text{ц}} = 780$ МВ/м, $f'_{\text{ц}} = 0,46$ МПа;
 при $E_{\max} = 550$ МВ/м
 $E_{1\text{сф}} = 23$ МВ/м, $E_{2\text{сф}} = 1000$ МВ/м, $f'_{\text{сф}} = 0,5$ МПа, $E_{1\text{ц}} = 32$ МВ/м, $E_{2\text{ц}} = 1070$ МВ/м, $f'_{\text{ц}} = 1,0$ МПа.

Как видно из приведенных данных, значения ПСЭП достаточно велики, а динамический характер их приложения с ростом частоты приводит к локальному разрушению границы раздела, т. е. СПЭ, тем самым приводит к ускорению зарождения и развития микрополостей, заполнению их водой и, следовательно, зарождению ВТ. Далее граница раздела передвигается, что приводит к росту ВТ. Теоретическое предположение о том, что с увеличением частоты поля ускоряются процессы зарождения и развития ВТ, подтверждено экспериментально [10, 11].

После зарождения ВТ будет стремиться развиваться вдоль силовых линий электрического поля, однако его траектория не будет прямолинейной, так как развитие ВТ будет идти по неоднородностям и слабым местам в полимерной изоляции, что приведет к появлению сложной конфигурации и развития ВТ (в виде куста, ветвистых побегов, дельтовидной формы и т. п.).

Выводы. 1. Электрическое поле оказывает влияние на сорбцию влаги полимерными диэлектриками. Существенное влияние оказывает неоднородное электрическое поле (как постоянное, так и переменное). Молекулы воды втягиваются в область большей неоднородности поля независимо от полярности поля. По мере втягивания при постоянном напряжении будет расти значение пондеро-

моторных сил электрического поля, действующих на молекулы воды, а при переменном напряжении приложение сил будет иметь динамический характер и амплитуда этих сил будет увеличиваться. При этом электрические силы будут складываться с обычными сорбционными силами, хотя значение последних будет снижаться по мере увлажнения полимера.

2. При локальном накоплении влаги в полимере в электрическом поле будут действовать силы (тяга и давление), стремящиеся деформировать сферический объем воды: перевести его в эллипсоид или в цилиндрическую форму, вытянутую в направлении силовых линий электрического поля.

3. На границе раздела локально накопленной влаги — полимер возникают значительные удельные давления пондеромоторных сил электрического поля. При постоянном напряжении они имеют статический характер, а при переменном — динамический, частота приложения которых в 2 раза выше частоты внешнего поля. Независимо от направления внешнего поля удельные давления всегда будут действовать на полимер, так как его относительная диэлектрическая проницаемость существенно меньше относительной диэлектрической проницаемости воды.

4. Значительные удельные давления пондеромоторных сил электрического поля, ослабляя химические и межмолекулярные силы связей в макромолекулах полимера, приводят к локальному разрушению его, образованию каналов в нем и заполнению их водой, т. е. приводят к зарождению и развитию водных триингов в полимерной изоляции. При переменном напряжении этот процесс существенно ускоряется из-за динамического характера приложения нагрузки к полимеру.

5. Изучение зарождения и развития водных триингов имеет большое практическое значение, поскольку их наличие в полимерной изоляции

существенно снижает ее ресурс. Увеличение стойкости полимерной изоляции к водным триингам можно достичь следующими способами: конструктивными (создание препятствий проникновению воды в изделие) и техническими (улучшение технологии изготовления полимерной изоляции, повышение чистоты полимерных композиций, введение специальных добавок, замедляющих зарождение и развитие водных триингов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов М. М. Влагопроницаемость органических диэлектриков. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1960.
2. Доценко Н. С., Соболев В. В. Долговечность элементов радиоэлектронной аппаратуры (влияние влаги). — Л.: Энергия, 1973.
3. Роджерс К. Проблемы физики и химии твердого состояния органических соединений. — М.: Мир, 1968.
4. Вода в полимерах / Под ред. С. Роуланда. — М.: Мир, 1984.
5. Чалых А. Е. Диффузия в полимерных системах — М.: Химия, 1987.
6. Шимони Карой. Теоретическая электротехника. М.: Мир, 1964.
7. Тамм И. Е. Основы теории электричества — М.: Наука, 1989.
8. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. — М.: Энергия, 1973.
9. Гордеев Г. М., Канискин В. А., Башен Н. Некоторые вопросы исследования триинга в кабельном полиэтилене. Деп. рукопись. — М.: Информэлектро, 1988, № 378-эт 88.
10. Водный триинг в кабельных полиэтиленовых композициях / Н. А. Васильев, В. А. Канискин, Д. И. Кузнецов и др. Кабельная техника: сборник статей, Л. — «Судостроение», 1989, с. 102—106.
11. Канискин В. А., Середа Г. Г. Оценка стойкости кабельной полиэтиленовой изоляции к водным триингам — Изв. вузов. Энергетика, 1989, № 12.
12. Eichhorn R. M. — IEEE Trans. on Elec. Insul., 1977, vol. EI-12, N 1.
13. Noto F. — IEEE Trans. on Elec. Insul., 1980, vol. EI-15, N 3.
14. Nunes S. L., Show M. I. IEEE Trans. on Elec. Insul., 1980, vol. EI-15, N 6.
15. O. Katsunori, H. Tsuneo, K. Hitoshi et al. — Proc. 21-st Symp. Elec. Insul. Mater., 1988. — Tokyo, 1988, p. 263—266.

[19.12.90]

Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6—10 кВ

ШУИН В. А., канд. техн. наук

Ивановский энергетический институт

В опубликованных работах (например [1—5 и др.]), посвященных анализу переходных процессов при замыканиях на землю ($K_3^{(1)}$) в сетях 6—10 кВ, основное внимание уделяется, как правило, оценке значений переходных токов и напряжений. Особенности начальных фазовых соотношений электрических величин переходного процесса при $K_3^{(1)}$ (здесь и в дальнейшем под ними понимаются соотношения начальных знаков переходных токов i_0 и напряжения u_0 нулевой последовательности), на использовании которых основано действие направленных импульсных устройств сигнализации и защиты от $K_3^{(1)}$ (УСЗЗ) [6—8 и др.], исследованы недостаточно.

Приводимый ниже анализ имеет целью получение аналитических соотношений, позволяющих определить основные причины, условия возникновения и характер искажений начальных фазовых соотношений величин i_0 и u_0 переходного процесса при $K_3^{(1)}$ в компенсированных и некомпенсированных сетях 6—10 кВ наиболее распространенного типа — радиальной конфигурации с одним источником питания, и дать качественную и приближенную количественную оценку зависимости последних от основных влияющих факторов (параметров сети и поврежденной линии, начальной фазы пробоя изоляции на землю, смещения нейтрали сети и наличия тока в дугогасящем реакторе в момент, предшествующий $K_3^{(1)}$).

О выборе схемы замещения сети. Аналитическое решение переходного процесса для величин i_0 и u_0 при $K_3^{(1)}$ можно получить только для достаточно упрощенной модели сети в режиме $K_3^{(1)}$. В то же время модель должна учитывать по возможности все основные факторы, влияющие на форму и амплитуду тока i_0 и напряжения u_0 в начальной стадии переходного процесса при $K_3^{(1)}$.

Анализ осциллограмм, полученных на физической модели сети, учитывающей распределенный характер параметров линий [9], а также эксперименты, проведенные в отдельных реальных сетях, показывают, что в кабельных сетях 6—10 кВ даже при сравнительно небольших удаленностях точки $K_3^{(1)}$ от шин (порядка десятков метров) в разрядных и зарядных составляющих i_0 и u_0 (обусловленных соответственно процессами разряда емкости поврежденной фазы и заряда емкостей неповрежденных фаз сети) преобладают по одной частотной составляющей, определяющей их форму и амплитуду. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что частота и амплитуда указанных частотных составляющих определяются практически только суммарной емкостью фаз сети на землю и суммарными междупазовыми емкостями неповрежденной части сети, параметрами поврежденной

линии на участке от шин до точки $K_3^{(1)}$, а также переходным сопротивлением R_n в месте повреждения.

В соответствии с этим сложный волновой переходный процесс при $K_3^{(1)}$ в кабельных сетях 6—10 кВ допустимо приближенно рассматривать как переходный процесс в схеме с сосредоточенными параметрами (исключение составляют случаи $K_3^{(1)}$ на шинах, когда необходимо учитывать явно выраженный волновой характер разрядных составляющих тока i_0 и напряжения u_0 [9]). Составленная с учетом принятых допущений схема замещения для анализа переходных процессов при $K_3^{(1)}$ в радиальной кабельной сети приведена на рис. 1. Сравнение кривых переходных тока i_0 и напряжения u_0 , полученных экспериментально на указанной выше физической модели кабельной сети (рис. 2, сплошные линии) и расчетным путем по схеме рис. 1 (пунктирные линии) показывают достаточно хорошее их совпадение. Из рис. 2, а можно видеть, что даже в сети с большим числом линий и суммарным емкостным током I_{Σ} расчетные кривые с приемлемой точностью отражают основные параметры, необходимые для качественного и приближенного количественного анализа начальных фазовых соотношений электрических величин переходного процесса i_0 и u_0 (амплитуду, длительность первых полу-

Уравнения переходного процесса при $K_3^{(1)}$ для сети с изолированной нейтралью.

Из схемы рис. 1, используя методы симметричных составляющих и наложения (для учета смещения нейтрали сети $u_N(0)$), для напряжения нулевой последовательности u_0 (в момент пробоя изоляции фазы на землю) в операторной форме получим

$$u_0(p) = U_m \omega_1^2 \frac{(\omega \cos \varphi + p \sin \varphi)(p^2 + \omega_1^2)}{(p^2 + \omega^2)\Delta(p)} + u_N(0) \omega_1^2 \frac{p^2 + \omega_2^2}{p\Delta(p)} - u_N(0) \frac{1}{p}, \quad (1)$$

где

$\Delta(p) = p^4 + \alpha p^3 + (k_c \omega_1^2 + \omega_2^2) p^2 + \alpha \omega_2^2 p + \omega_1^2 \omega_2^2$; $\alpha_1 = R_1/L_1$; $\omega_1^2 = 1/L_1 C_1$; $\omega_2^2 = 1/L_2 C_2$; $k_c = 1 + C_1/C_2$; $L_1 = 3L_n + L_{\Sigma}$; $C_1 = C_{0\Sigma} + C_{0n}$; $L_2 = 2L_n$; $C_2 = 0,5[C_{0\Sigma} + C_{0n} + 3(C_{M\Sigma} + C_{Mn})]$; $R_1 = 3R_n + R_3 + R_n$; $u_N(0) = 1/3[u_a(0) + u_b(0) + u_c(0)]$ — смещение нейтрали сети в момент, предшествующий $K_3^{(1)}$.

Частоты и постоянные затухания свободных составляющих переходного процесса определяются из решения уравнения $\Delta(p) = 0$. Поскольку точное решение уравнения 4-го порядка весьма громоздко, решим задачу приближенным способом для случая малых потерь в цепи тока $K_3^{(1)}$, когда частоты свободных составляющих практически не зависят от их постоянных затуханий.

хания. Такие случаи в кабельных сетях 6—10 кВ при $K_3^{(1)}$ имеют место при небольших значениях переходного сопротивления R_n в месте повреждения (в кабельных сетях 6—10 кВ влиянием R_n , определяемым сопротивлением дуги в месте повреждения в начальной стадии переходного процесса, как правило, можно пренебречь, например, [10]).

С учетом принятого допущения приближенные значения частот зарядной ω_3 и разрядной ω_p составляющих тока и напряжения переходного процесса определяются из решения биквадратного уравнения (2) при $\alpha=0$. Приближенные значения постоянных затухания δ_p и δ_3 можно определить, разложив $\Delta(p)$ в ряд Тейлора по степеням α , δ_p и α , δ_3 (соответственно в окрестности точек $p = -\delta_p \pm j\omega_p$ и $p = -\delta_3 \pm j\omega_3$) и ограничившись в разложениях первыми их степенями.

Используя теорему разложения операторного исчисления, для найденных указанным образом* значений ω_p , ω_3 , δ_p , δ_3 при $\omega_p^2 \gg \omega^2$, $\omega_3^2 \gg \omega^2$, что для кабельных сетей практически всегда обеспечивается из (1), получим

$$u_0(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_m a_1 e^{-\delta_p t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \times \right. \\ \times \sin(\omega_p t + \varphi_p) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_p t \left. \right] - U_m a_2 e^{-\delta_3 t} \times \\ \times \left[\frac{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}{\omega_3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_3 t \right], \quad (2)$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{\omega_p \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_p \sin \varphi}; \quad \operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{\omega_3 \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_3 \sin \varphi}; \\ a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_3^2}{\omega_p^2 - \omega_3^2}; \quad a_2 = \frac{\omega_1 - \omega_3^2}{\omega_3^2 - \omega_p^2}. \quad (3)$$

Ток i_0 определяется из выражения

$$i_0 = -C_1 du_0/dt. \quad (4)$$

Из анализа уравнений (2) и (4) можно сделать вывод, что смещение нейтрали $u_N(0)$ в момент возникновения $K_3^{(1)}$ может привести к искажениям начальных фазовых соотношений между u_0 и i_0 при следующих условиях:

знак $u_N(0)$ противоположен знаку $U_m \sin \varphi$ (этот случай иллюстрируется рис. 3, а);

знак $u_N(0)$ совпадает со знаком $U_m \sin \varphi$, но $|u_N(0)| > |U_m \sin \varphi|$.

Из (2) и (4) следует также, что смещение $u_N(0)$ не вызывает искажений начальных фазовых соотношений между свободными составляющими тока и напряжения переходного процесса u_{0p} и i_{0p} , $u_{0p} + u_{03}$ и $i_{0p} + i_{03}$. Учитывая это, для действия направленных импульсных УСЗЗ было бы целесообразно использовать только составляющие i_{0p} , i_{03} и u_{0p} , u_{03} . Однако выделение указанных составляющих из i_0 и u_0 с помощью частотных фильтров в интервале времени срабатывания измерительных и запоминающих элементов УСЗЗ (как правило, не превышающем нескольких десятков микросекунд) возможно не всегда, поэтому для действия последних практически приходится использовать полные ток i_0 и напряжение u_0 переходного процесса (точнее, ограниченную как «сверху», так и «снизу» часть спектра указанных величин).

В этих условиях не критичность УСЗЗ к искажениям начальных фазовых соотношений между u_0 и i_0 за счет влияния $u_N(0)$ можно обеспечить, как это следует из (4), используя в качестве поляризующей величины не

* Для сокращения объема статьи выражения для ω_p , ω_3 , δ_p , δ_3 не приводятся.

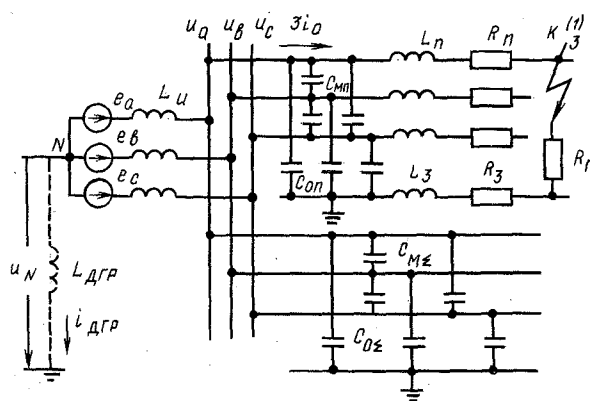


Рис. 1. Схема замещения радиальной кабельной сети с одним источником питания

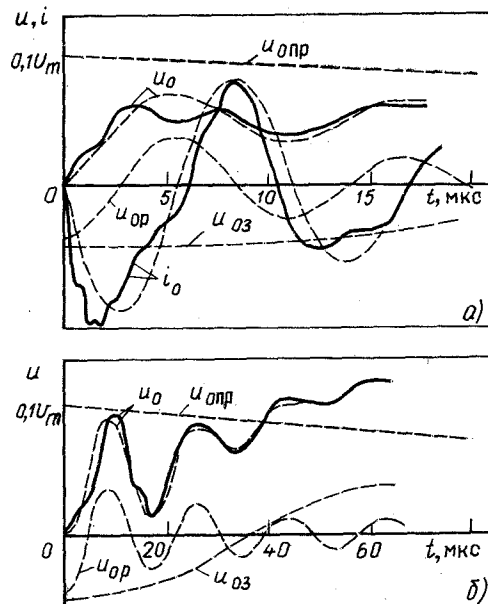


Рис. 2. Кривые переходных токов и напряжений при $K_3^{(1)}$ в сети с $U_{ном}=6$ кВ и $I_{сз} \approx 0,93$ А (5 кабельных линий длиной от 50 до 500 м) при $u_N(0)=0$ и $\varphi=175^\circ$: а — при $K_3^{(1)}$ на расстоянии от шин $l_k \approx 70$ м; б — при $K_3^{(1)}$ на расстоянии от шин $l_k \approx 460$ м (сплошной линией показаны кривые, полученные на физической модели, учитывающей распределенный характер параметров линий, пунктирной — расчетные)

u_0 , а производную напряжения du_0/dt (рис. 3). К преимуществам использования du_0/dt в качестве поляризующей величины следует отнести также возможность (при достаточной чувствительности УСЗЗ по первичному току) обеспечить правильную фиксацию начальных фазовых соотношений электрических величин переходного процесса даже при пробое изоляции в момент прохождения напряжения поврежденной фазы через нулевое значение.

Уравнения переходного процесса для компенсированной сети. Принимая характеристику намагничивания ДГР линейной и используя изложенный выше подход, для компенсированной сети при малых потерях в цепи тока $K_3^{(1)}$ можно получить следующие уравнения для u_0 , i_0 и du_0/dt :

$$u_0(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_m a_1 e^{-\delta_p t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \times \right. \\ \times \sin(\omega_p t + \varphi_p) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_p t + \frac{i_{ДГР}(0)}{C_1 \omega_p U_m} \sin \omega_p t \left. \right] -$$

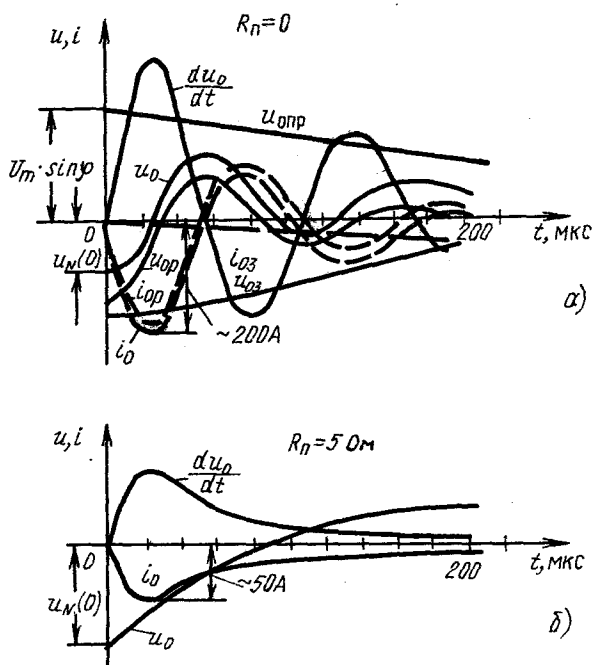


Рис. 3. Влияние смещения нейтрали сети $u_N(0)$ на фазовые соотношения переходных токов и напряжений в сети с изолированной нейтралью (сеть с $U_{ном}=6$ кВ, $I_{с\sum}=30$ А, $\varphi=175^\circ$, $I_k=100$ м)

$$-U_m a_2 e^{-\delta_2 t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_3 t + \frac{i_{ДГР}(0)}{C_1 \omega_p U_m} \sin \omega_3 t \right] - U_m e^{-\delta_2 t} \times$$

$$\times \left[\frac{\delta_a (\omega \cos \varphi - \delta_a \sin \varphi)}{\delta_a^2 + \omega^2} + \frac{u_N(0) \delta_a R_1 C_1}{U_m} + \frac{i_{ДГР}(0) R_1}{U_m} \right]; \quad (5)$$

$$i_0(t) = -v U_m \omega C_1 \cos(\omega t + \varphi) + U_m \omega_p C_1 a_1 e^{-\delta_1 t} \times$$

$$\times \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \cos(\omega_p t + \varphi_p) + \frac{u_N(0)}{U_m} \sin \omega_p t + \frac{i_{ДГР}(0)}{C_1 \omega_p U_m} \cos \omega_p t \right] + U_m \omega_3 C_1 a_2 e^{-\delta_2 t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3} \times \right.$$

$$\times \cos(\omega_3 t + \varphi_3) + \frac{u_N(0)}{U_m} \sin \omega_3 t + \frac{i_{ДГР}(0)}{C_1 \omega_3 U_m} \cos \omega_3 t \left. \right] -$$

$$- U_m \omega C_1 e^{-\delta_2 t} \left[\cos \varphi - \frac{\delta_a}{\omega} \sin \varphi + \frac{u_N(0) \delta_a \omega_3^2 (k_c - 1)}{U_m \omega \omega_3^2} + \frac{i_{ДГР}(0)}{\omega C_1 U_m} \right]; \quad (6)$$

$$\frac{du_0}{dt} = U_m \omega \cos(\omega t + \varphi) - U_m \omega_p a_1 e^{-\delta_1 t} \times$$

$$\times \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \cos(\omega_p t + \varphi_p) + \frac{u_N(0)}{U_m} \sin \omega_p t + \frac{i_{ДГР}(0)}{C_1 \omega_p U_m} \cos \omega_p t \right] - U_m \omega_3 a_2 e^{-\delta_2 t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3} \times \right.$$

$$\times \cos(\omega_3 t + \varphi_3) + \frac{u_N(0)}{U_m} \sin \omega_3 t + \frac{i_{ДГР}(0)}{C_1 \omega_3 U_m} \cos \omega_3 t \left. \right] +$$

$$+ U_m \delta_a e^{-\delta_2 t} \left[\frac{\delta_a (\omega \cos \varphi - \delta_a \sin \varphi)}{\delta_a^2 + \omega^2} + \frac{u_N(0) \delta_a R_1 C_1}{U_m} + \frac{i_{ДГР}(0) R_1}{U_m} \right]; \quad (7)$$

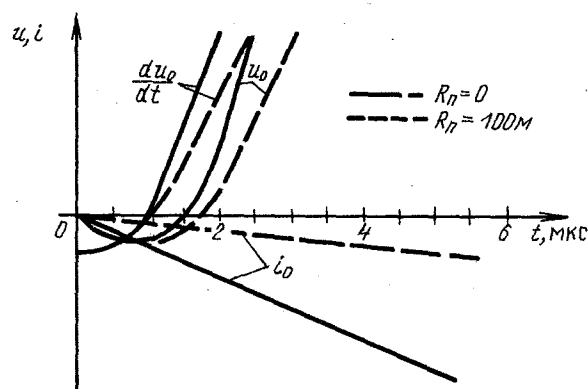


Рис. 4. Влияние тока $i_{ДГР}(0)$ на начальные фазовые соотношения величин du_0/dt и i_0 переходного процесса при $K_3^{(1)}$ в компенсированной сети (сеть с $U_{ном}=6$ кВ, $I_{с\sum}=30$ А, $\varphi=175^\circ$, $v=0$, $I_k=100$ м)

где $a_1, a_2, \varphi_p, \varphi_3$ — то же, что и в (3); δ_a — постоянная затухания аperiodической составляющей, обусловленной наличием ДГР.

Из уравнений (5) — (7) можно видеть, что в компенсированной сети причиной искажений начальных фазовых соотношений между u_0 и i_0 может быть не только $u_N(0)$, но и $i_{ДГР}(0)$ (например, рис. 4). Условия возникновения указанных искажений имеют более сложный, чем в сети с изолированной нейтралью характер, и зависят, как можно видеть из уравнений (5) и (6), от целого ряда факторов: $u_N(0)$, φ , $i_{ДГР}(0)$, частот и постоянных затухания свободных составляющих. Как и в сети с изолированной нейтралью, не критичны к влиянию искажающих факторов начальные фазовые соотношения между свободными составляющими u_{0p} , i_{0p} и u_{03} , i_{03} , однако использование их для действия УСЗЗ по причинам, указанным выше, возможно не всегда.

Из уравнения (7), пренебрегая аperiodической составляющей, для $t=0$ можно получить

$$\frac{du_0}{dt}(0) \cong - \frac{i_{ДГР}(0)}{C_1}.$$

Следовательно, в компенсированной сети при $i_{ДГР}(0) \neq 0$ начальный знак du_0/dt определяется только знаком тока $i_{ДГР}$ в момент, предшествующий $K_3^{(1)}$ (в сети с изолированной нейтралью $du_0/dt(0)=0$). Так как знак первой полу волны переходного тока i_0 зависит не только от $i_{ДГР}(0)$, но и других факторов ($u_N(0)$, φ), то наличие $i_{ДГР}(0) \neq 0$ может обусловить искажения начальных фазовых соотношений между du_0/dt и i_0 (рис. 4).

Следует однако отметить, что для отстройки от указанных искажений достаточно иметь первичный ток срабатывания УСЗЗ большим, чем ток $i_{ДГР}(0)$, значения которого при пробое изоляции в нормальном режиме не превышают величины $v C_1 \omega U_m = v I_{с\sum} \sqrt{2}$. Так как амплитуда переходного тока i_0 даже при возникновении $K_3^{(1)}$ в момент наличия на поврежденной фазе напряжения, близкого к нулю, во много раз больше указанной величины [при $\varphi \rightarrow 0$, как можно получить из (6), $i_{0 \max} \cong \omega C_1 U_m \gg v \omega C_1 U_m$], отстройка импульсных УСЗЗ от значений $i_{ДГР}(0)$, соответствующих нормальному режиму, практически не ограничивает их чувствительности по первичному току. Учитывая это, можно полагать, что использование в импульсных направленных УСЗЗ в качестве поляризующей величины du_0/dt вместо u_0 в принципе позволяет обеспечить более высокую устойчивость их функционирования как в сетях с изолированной нейтралью, так и в компенсированных сетях.

При перемежающемся дуговом $K_3^{(1)} i_{дгр}(0)$ может принимать значительно большие значения, чем перед пробоем изоляции в нормальном режиме, поэтому отстройка от $K_3^{(1)}$ в этих условиях могла бы привести к значительному заглублению УСЗЗ по первичному току. Поэтому при перемежающихся дуговых $K_3^{(1)}$ не критичность УСЗЗ к искажениям начальных фазовых соотношений между электрическими величинами нулевой последовательности, обусловленными возросшими значениями $i_{дгр}(0)$, проще обеспечить, как это и делается в большинстве известных исполнений направленных импульсных УСЗЗ, за счет блокировки возврата их измерительных и запирающих элементов на время существования в сети смещения нейтрали $u_N(0)$, превышающего допустимые для нормального режима значения.

Увеличение потерь в цепи тока $K_3^{(1)}$ (большое переходное сопротивление R_n в месте повреждения, значительная удаленность точки $K_3^{(1)}$ от шин) не меняет качественно основные закономерности, характеризующие начальные фазовые соотношения u_0 и i_0 в переходном режиме при $K_3^{(1)}$ и влияние на них $u_N(0)$ и $i_{дгр}(0)$ (например, рис. 3, б и 4). Однако для получения достаточно точных количественных оценок, характеризующих соотношения электрических величин переходного процесса u_0 , i_0 , du_0/dt , в указанных случаях необходимо использовать моделирование на ЭВМ, что позволяет также применить более точные модели элементов сети, учитывающие (в необходимых случаях) распределенный характер параметров линий.

Полученные аналитические соотношения позволяют предварительно выявить режимы, представляющие интерес для анализа на ЭВМ, оценить диапазон изменения основных влияющих на начальные фазовые соотношения u_0 , i_0 , du_0/dt факторов и за счет этого уменьшить объем необходимых расчетов на ЭВМ. Соотношения могут быть использованы также для качественного ана-

лиза начальных фазовых соотношений и в воздушных сетях радиальной конфигурации (в воздушных сетях при расчетах переходных процессов при $K_3^{(1)}$ влияние потерь в проводах линии и земле и переходного сопротивления в месте повреждения, как правило, пренебречь нельзя).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сирота И. М., Масляник В. В. Свободные емкостные токи замыкания на землю в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю / Электричество, 1977, № 3.
2. Сирота И. М., Кисленко С. Н., Михайлов А. М. Режимы нейтрали электрических систем — Киев: Наук. думка, 1985.
3. Шуляк В. Г. Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью при замыканиях на землю — Изв. вузов Энергетика, 1969, № 1.
4. Цапенко Е. Ф. Замыкания на землю в сетях 6—35 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 128 с.
5. Дударев Л. Е., Зубков В. В. Некоторые особенности переходных процессов при замыкании фазы на землю в сетях 6—35 кВ и использование их для средств релейной защиты. — Электрические станции, 1978, № 6.
6. Попов И. Н., Соколова Г. В., Махнев В. И. Импульсная направленная защита электрических сетей от замыканий на землю типа ИЗС. — Электрические станции, 1978, № 4.
7. Зубков В. В., Стасенко В. Н. Комплексная защита от замыканий на землю — Электрические станции, 1981, № 7.
8. Лебедев О. В., Чухин А. М., Шуин В. А. Централизованное импульсное направленное устройство сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях — В кн.: Релейная защита и автоматика электрических систем. — Рига: Рижск. политехн. ин-т, 1985.
9. Шуин В. А. Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3—10 кВ. — Электричество, 1983, № 12.
10. Беляков Н. Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью. — Электричество, 1957, № 5.

[28.06.90]

УДК 621.311.064.1.001.24

Расчет токов коротких замыканий синхронных генераторов автономных систем электроснабжения 6—10 кВ

ЖУКОВ В. В., канд. техн. наук, ГЕОРГИАДИ В. Х., канд. техн. наук, МЕДЖАХЕД А., инж.

Московский энергетический институт — Союзтехэнерго

Для расчета периодической составляющей тока короткого замыкания к. з. в произвольный момент времени в настоящее время применяется метод типовых кривых [1, 2]. Этот метод основан на использовании специальных кривых, характеризующих изменение периодической составляющей тока во времени при разных удаленностях точки к. з. Кривые получены на базе параметров гидро- и турбогенераторов мощностью до 500 МВт включительно и ориентированы на определение токов к. з. в крупных энергосистемах.

В зарубежной практике расчетов токов к. з. наибольшее распространение имеет метод, рекомендуемый Международной электротехнической комиссией (МЭК) [3]. Согласно этому методу для расчета начального значения тока к. з. в промышленных сетях или в сетях низкого напряжения генератор представляют приведенным сопротивлением прямой последовательности

$$Z_G = R_G + jx'_d,$$

где x'_d — сверхпереходное индуктивное сопротивление

генератора; R_G — активное сопротивление генератора, принимаемое равным 0,07% для генераторов с $U_G > 1$ кВ и $S_G < 100$ МВ·А и $R_G = 0,15\%$ при $U_G < 1$ кВ.

При определении тока к. з. к моменту отключения используется коэффициент μ ($I_b = I'_k \mu$), определяемый по специальным кривым (рис. 1) в зависимости от продолжительности к. з.

Для сравнения способов определения тока к. з. в произвольный момент времени по исследуемым методам [1, 3] на рис. 1 приведены также типовые кривые (штриховые линии) [1], которые были перестроены для координат $\mu = f(I'_k/I_{ном})$. Анализ приведенных на рис. 1 кривых указывает на их значительное расхождение.

В настоящее время в СССР в качестве основных автономных источников электроэнергии (автономные системы надежного питания АЭС, промышленные и сельскохозяйственные автономные системы) применяют синхронные генераторы малой мощности. В таблице представлены параметры схемы замещения наиболее

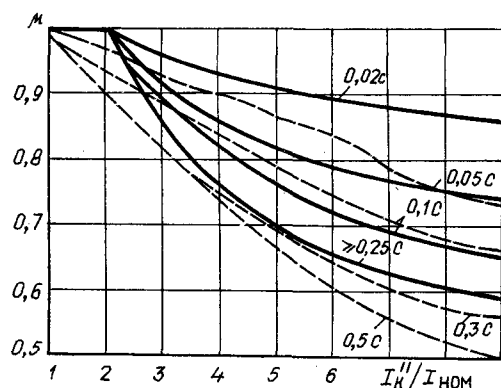


Рис. 1. Изменение тока к. з. от синхронных генераторов для различных моментов к. з.

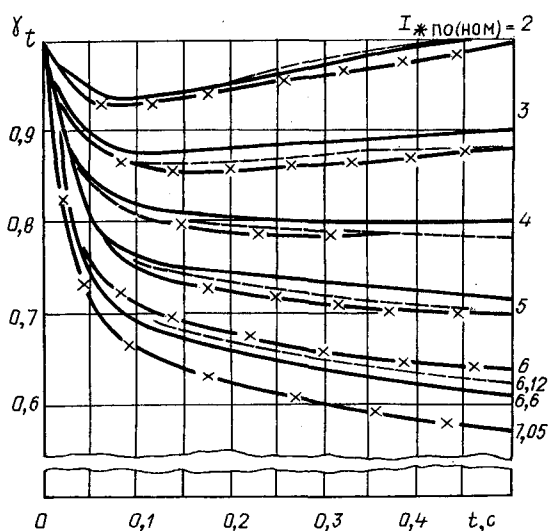


Рис. 2. Изменение периодической составляющей тока к. з. от синхронных генераторов: — — — СГДС 15-54-8 ($P_{ном} = 1000$ кВт, $U_{ном} = 10,5$ кВ); — — — СГДС 15-74-8 ($P_{ном} = 1600$ кВт, $U_{ном} = 10,5$ кВ); — × — СГДС 15-94-8 ($P_{ном} = 2000$ кВт, $U_{ном} = 10,5$ кВ)

распространенных типов синхронных генераторов малой мощности напряжением 6—10 кВ.

Применение типовых кривых [1], а также кривых МЭК (рис. 1) при расчетах токов к. з. от указанных выше автономных источников может привести к значительным погрешностям, так как их параметры существенно

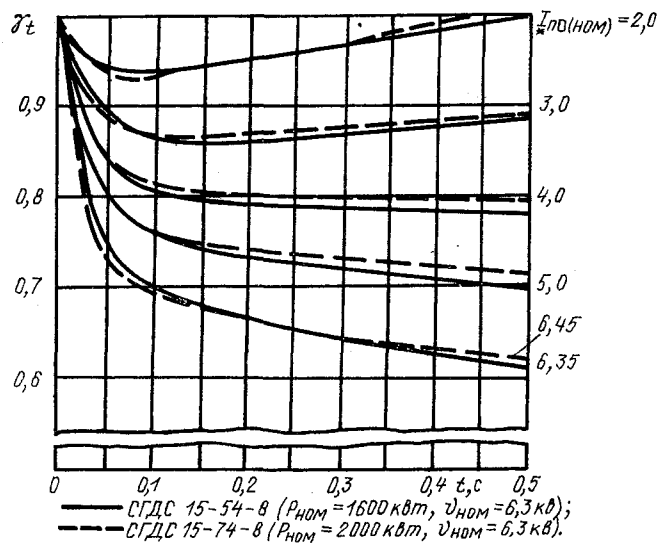


Рис. 3. Изменение периодической составляющей тока к. з. от синхронных генераторов: — — — СГДС 15-54-8 ($P_{ном} = 1600$ кВт, $U_{ном} = 6,3$ кВ); — — — СГДС 15-74-8 ($P_{ном} = 2000$ кВт, $U_{ном} = 6,3$ кВ)

отличаются от параметров тех генераторов, для которых были построены эти кривые. Поэтому возникла необходимость построения аналогичных кривых с учетом параметров автономных источников электроэнергии.

Расчет кривых изменения периодической составляющей тока к. з. от синхронных генераторов был выполнен с помощью ЭВМ. Алгоритм расчета представлял собой систему полных дифференциальных уравнений Парка — Горева, численное интегрирование которой осуществлялось методом Рунге — Кутты. Расчеты проводились для мгновенной форсировки возбуждения по напряжению с кратностью $K_f = 2,0$ на кольцах ротора, что приближенно соответствовало модели вентильной системы возбуждения.

Используя параметры схем замещения указанных выше генераторов (см. таблицу), были рассчитаны для них кривые изменения во времени тока к. з., некоторые из кривых приведены на рис. 2—4 в виде отношения $I_{k1}/I_{Gn0} = f(t)$.

Чтобы определить ток к. з. в произвольной точке расчетной схемы, необходимо предварительно найти удаленность этой точки от синхронного генератора. Обычно под удаленностью точки к. з. от синхронного генератора понимают приведенное к номинальной мощности и номинальному напряжению генератора внешнее

Параметры схемы замещения синхронных генераторов

Тип, мощность и напряжение генераторов	Параметры схемы замещения синхронных генераторов										
	r_s	r_f	r_{LD}	r_{LQ}	x_o	x_{ad}	x_{aq}	x_{af}	x_{oLD}	x_{oLQ}	x_d''
СГДС 15.548, 1000 кВт, 10,5 кВ	0,0066	0,0014	0,0221	0,0187	0,096	0,886	0,494	0,184	0,134	0,1	0,1673
СГДС 15.74.8, 1600 кВт, 10,5 кВ	0,0081	0,0016	0,0228	0,0189	0,1	1,015	0,564	0,21	0,15	0,112	0,181
СГДС 15.94.8, 2000 кВт, 10,5 кВ	0,0063	0,0013	0,0212	0,0156	0,084	0,922	0,513	0,19	0,131	0,0985	0,1805
СГДС 15.74.8, 200 кВт, 6,3 кВ	0,007	0,0015	0,0222	0,0202	0,0967	1,01	0,552	0,2	0,144	0,108	0,1740
СГДС 15.54.8, 1600 кВт, 6,3 кВ	0,0081	0,0014	0,0223	0,0209	0,098	0,922	0,5	0,188	0,135	0,101	0,1704
СБГД 6300, 6300 кВт, 6,3 кВ	0,0038	0,001	0,0187	0,0158	0,0758	1,148	0,652	0,192	0,101	0,0757	0,138
Эквивалентный генератор	0,0054	0,0012	0,0237	0,0173	0,0847	1,0134	0,5767	0,1927	0,1324	0,0899	0,1586

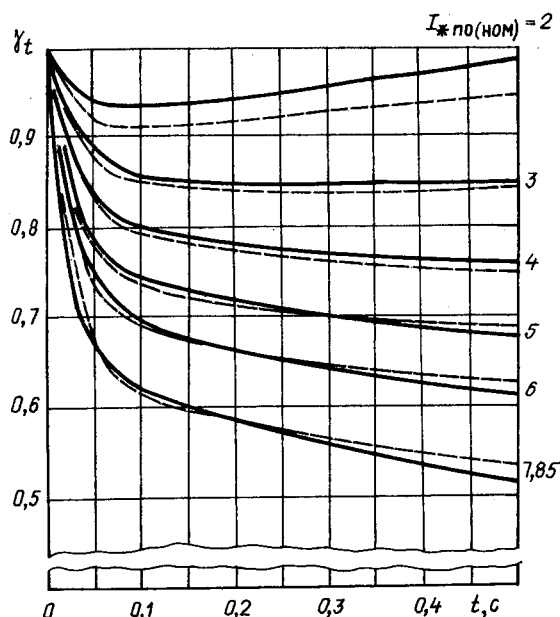


Рис. 4. Изменение периодической составляющей тока к. з. от синхронных генераторов: — — — СБГД-4000-6ТЗ ($P_{\text{ном}} = 4000$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6,3$ кВ); — — — СБГД-6300-6у3 ($P_{\text{ном}} = 6300$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6,3$ кВ)

сопротивление, которое оказывается подключенным к машине в результате к. з. Однако такая оценка удаленности применима лишь в том случае, когда расчетная схема содержит только одну или несколько однотипных генераторов, находящихся в одинаковых условиях по отношению к точке к. з. Во всех других случаях понятие внешнего сопротивления лишено смысла. Более удобной и более универсальной величиной, которая в полной мере характеризует удаленность точки к. з. от генератора и может быть определена в любой схеме и при любом числе источников питания, является отношение тока генератора в момент к. з. ($I_{G\text{н}0}$) к его номинальному току ($I_{G\text{ном}}$), т. е.

$$I_{G\text{н}0(\text{ном})} = I_{G\text{н}0} / I_{G\text{ном}} \quad (1)$$

При удаленных к. з. начальный относительный ток к. з. от генератора $I_{G\text{н}0(\text{ном})}$ обычно составляет 1—2; по мере приближения точки к. з. к генератору этот ток увеличивается примерно до 6—8 (рис. 2—4).

Сравнение кривых $I_{G\text{н}0} / I_{G\text{н}0} = f(t)$ для генераторов, построенных при одинаковых удаленностях точки к. з., показывает, что они отличаются друг от друга сравнительно мало, даже если их параметры существенно разнятся. Это обусловлено принятым способом построения кривых: токи к. з. здесь отнесены к начальным токам к. з. от генераторов. При этом нивелируются различия параметров генераторов и кривые $I_{G\text{н}0} / I_{G\text{н}0} = f(t)$ для разных генераторов располагаются сравнительно близко друг от друга. Поэтому вместо указанных кривых для отдельных генераторов разных типов для расчетов с допустимой погрешностью целесообразно иметь единые кривые для всех типов автономных источников электроэнергии. Такие кривые разработаны в результате эквивалентирования.

В основу эквивалентирования приведенной в таблице группы синхронных генераторов положен метод функционально-параметрического эквивалентирования [4, 5]. Суть метода заключается в предположении совпадения режимных характеристик переходных процессов исходной системы (группы генераторов) и эквивалента и определении параметров, отвечающих принятому кри-

терию эквивалентирования. В результате сравнения и соответствующего преобразования систем дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в генераторах исходной системы и эквиваленте определены аналитические выражения для расчета эквивалентных параметров схемы замещения.

Критерием эквивалентирования группы синхронных генераторов принято равенство между комплексом тока эквивалентного генератора и суммарным комплексом токов эквивалентируемых генераторов для любого момента времени. При одном и том же номинальном напряжении для генераторов это соответствует равенству полных мощностей эквивалентного $S_{G\text{э}}$ и эквивалентируемых $\sum_{k=1}^N S_{Gk}$ генераторов:

$$S_{G\text{э}} = \sum_{k=1}^N S_{Gk} \quad (2)$$

Для принятого критерия эквивалентирования выражения, определяющие активные сопротивления схемы замещения эквивалентного синхронного генератора, имеют вид [4]:

$$r_{d\text{э}} = \frac{\sum_{k=1}^M S_k a_{11k} a_{13k} a_{14k} r_{dk}}{S_3 a_{113} a_{133} a_{143}}; \quad (3)$$

$$r_{q\text{э}} = \frac{\sum_{k=1}^M S_k a_{22k} a_{25k} r_{qk}}{S_3 a_{223} a_{253}}; \quad (4)$$

$$r_{j\text{э}} = \frac{\sum_{k=1}^M S_k a_{13k} a_{33k} r_{jk}}{S_3 a_{133} a_{333} a_{343}}; \quad (5)$$

$$r_{D\text{э}} = \frac{\sum_{k=1}^M S_k a_{14k} a_{34k} a_{44k} r_{Dk}}{S_3 a_{143} a_{343} a_{443}}; \quad (6)$$

$$r_{Q\text{э}} = \frac{\sum_{k=1}^M S_k a_{25k} a_{55k} r_{Qk}}{S_3 a_{253} a_{553}}; \quad (7)$$

где a_{11} , a_{13} , a_{14} и т. д. — коэффициенты пропорциональности, полученные в результате обращения матрицы индуктивности синхронного генератора; a_{113} , a_{133} , a_{143} и т. д. — эквивалентные коэффициенты пропорциональности, имеющие вид $a_{ij\text{э}} = S_3 / \sum_{k=1}^M S_k a_{ijk}$.

Индуктивные сопротивления схемы замещения эквивалентного синхронного генератора ($x_{d\text{э}}$, $x_{q\text{э}}$, $x_{ad\text{э}}$, $x_{aq\text{э}}$, $x_{j\text{э}}$, $x_{D\text{э}}$, $x_{Q\text{э}}$) получены в результате формирования матрицы эквивалентных коэффициентов пропорциональности эквивалентного генератора и ее обращения.

В результате расчетов, выполненных на ЭВМ с использованием параметров схем замещения указанных выше генераторов, получены параметры схемы замещения эквивалентного генератора, которые приведены в таблице. Используя параметры схемы замещения эквивалентного генератора, для него разработаны кривые изменения во времени тока к. з. при разных удаленностях точки к. з. (рис. 5). Учитывая возможность применения указанных кривых для расчета токов к. з., соответствующих отключению их при срабатывании резервных защит, продолжительность к. з. принята равной 1,5 с.

Из изложенного способа построения типовых кривых следует простая методика их использования. Если автономная система содержит только один синхронный ге-

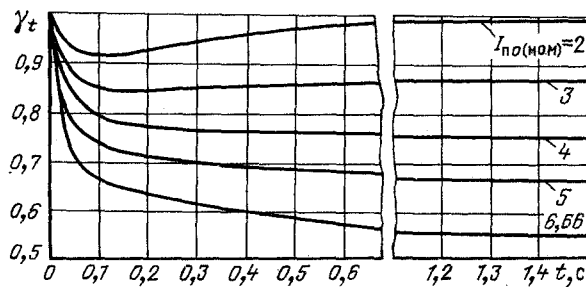


Рис. 5. Изменение периодической составляющей тока к. з. от эквивалентного синхронного генератора

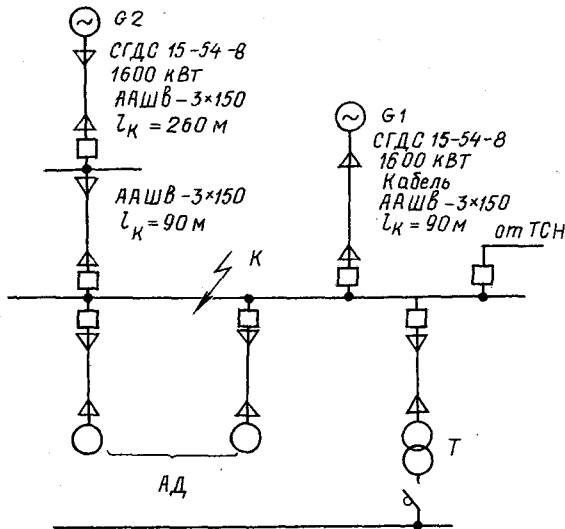


Рис. 6. Схема автономного электроснабжения (G1 и G2 — синхронные дизельгенераторы, АД — асинхронные двигатели, ТСН — трансформатор собственных нужд)

нератор, то расчет тока к. з. с использованием метода типовых кривых ведут в следующей последовательности:

1. Для исходной расчетной схемы составляют схему замещения, в которой генераторы представляют сверхпереходным сопротивлением x_d'' и сверхпереходной э. д. с., значение которой определяют по выражению

$$E_g'' = \sqrt{(U + I x_d'' \sin \varphi)^2 + (I x_d'' \cos \varphi)^2}, \quad (8)$$

где U , I , φ — соответственно напряжение, ток и угол сдвига тока и напряжения синхронного генератора до короткого замыкания.

2. Находят суммарную реактивность x_Σ схемы замещения относительно точки к. з. и определяют начальный ток к. з. от генератора

$$I_{Gp0} = E_g'' / x_\Sigma. \quad (9)$$

3. Определяют начальный относительный ток (2) $I_{Gp0(ном)}$ и исходя из его значения на рис. 2—4 или рис. 5 выбирают соответствующую кривую и по этой кривой для нужного момента t находят отношение $I_{Gt} / I_{Gp0} = \gamma_t$. Если значение $I_{Gp0(ном)}$ оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого числа или производят интерполирование кривых.

4. По найденному отношению γ_t определяют искомое значение периодической составляющей тока к. з. в мо-

мент времени t :

$$I_{Gt} = \gamma_t I_{Gp0}.$$

Изложенный порядок расчета тока к. з. сохраняется и при наличии в схеме нескольких синхронных генераторов.

Пример. Для системы автономного электроснабжения (рис. 6) требуется определить начальное значение периодической составляющей тока трехфазного к. з. синхронных генераторов и их периодическую составляющую тока к моменту отключения 0,5 и 1,0 с при к. з. в точке К. Исходные данные приведены на рис. 6.

Расчет выполняем при следующих базисных условиях: $S_6 = 2000$ кВ·А; $U_6 = 6,3$ кВ; $I_6 = 183,3$ А; $z_6 = 19,84$ Ом. Ток к. з. рассчитываем по формулам (9) и (10).

Для генератора G1 имеем:

$$E_{G1} = \sqrt{(1 + 0,1704 \cdot 0,6)^2 + (0,1704 \cdot 0,8)^2} = 1,11; \quad z_{k61} = 0,0011 + j0,000338; \quad I_{n0G1} = (1,11 / \sqrt{0,0011^2 + 0,000338^2}) 183,3 = 1191,6 \text{ А}.$$

Для расчета тока к. з. к моменту отключения определяем $I_{n0G1ном} = 1191,6 / 183,3 = 6,5$.

По расчетным кривым рис. 3 для моментов времени 0,5 и 1,0 с определяем $\gamma_{(t=0,5)} = 0,62$ и $\gamma_{(t=1,0)} = 0,18$; $I_{nG1(t=0,5)} = 1191,6 \cdot 0,62 = 738,8$ А; $I_{nG1(t=1,0)} = 1191,6 \cdot 0,18 = 214,5$ А.

Для цепи генератора G2 имеем:

$$z_{k62} = 0,0662 + j0,0689; \quad z_{k63} = 0,00333 + j0,00347; \quad I_{n0G2} = 6,38 \cdot 183,3 = 1170 \text{ А}; \quad \gamma_{(t=0,5)} = 0,625; \quad \gamma_{(t=1,0)} = 0,59; \quad I_{nG2(t=0,5)} = 1170 \cdot 0,625 = 731 \text{ А}; \quad I_{nG2(t=1,0)} = 1170 \cdot 0,59 = 690 \text{ А}.$$

Сравним полученные данные с результатами расчета, в котором использованы кривые эквивалентного генератора (рис. 5).

Для G1: $\gamma_{(t=0,5)} = 0,59$; $\gamma_{(t=1,0)} = 0,56$; $I_{nG1(t=0,5)} = 703$ А; $I_{nG1(t=1,0)} = 667$ А, погрешность $\Delta I_{(t=0,5)} = \frac{738,8 - 703}{738,8} 100 = 4,8 \%$; $\Delta I_{(t=1,0)} = 3,5 \%$.

Для G2: $\gamma_{(t=0,5)} = 0,635$; $\gamma_{(t=1,0)} = 0,61$; $I_{nG2(t=0,5)} = 743$ А; $I_{nG2(t=1,0)} = 714$ А; $\Delta I_{(t=0,5)} = 1,6 \%$; $\Delta I_{(t=1,0)} = 3,5 \%$.

Таким образом погрешность при замене расчетных кривых $\gamma_t = f(t)$ синхронного генератора СГДС 15-54-8 соответствующими кривыми эквивалентного генератора не превышает 5 %. Столь же малые значения погрешностей, полученные для других генераторов, позволяют сделать заключение о возможности применения при расчетах токов к. з. кривых $\gamma_t = f(t)$ эквивалентного генератора.

Выводы. 1. Разработаны кривые изменения во времени периодической составляющей тока к. з. при разных удаленностях точки к. з. для различных синхронных генераторов автономных систем.

2. В результате эквивалентирования определены параметры схемы замещения эквивалентного генератора автономных энергетических систем напряжением 6—10 кВ.

3. Разработаны типовые кривые изменения во времени периодических составляющих тока к. з. при разных удаленностях точки к. з. для эквивалентного генератора автономных энергетических систем. Даны методика и пример расчета токов к. з. в автономных системах электроснабжения методом типовых кривых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнер И. Г., Крючков И. П. Кривые изменения периодической составляющей тока короткого замыкания мощных генераторов с учетом влияния энергосистемы. — Электричество, 1975, № 10.
2. ГОСТ 27514—87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.

3. Commission electrotechnique internationale: Publ. 909.— Paris, 1988.
4. Жуков В. В., Меджахед А. Методика эквивалентирования группы синхронных электродвигателей / МЭИ: Деп. рукопись — М.: Информэнерго, 1989, № 3136-эн 89.
5. Жуков В. В., Меджахед А. Эквивалентирование асинхронной нагрузки. — Изв. вузов. Энергетика, 1990, № 5.

[30.05.91]

УДК 621.313.323.014.38.001.24

Об учете тока короткого замыкания от синхронных электродвигателей

СЛОДАРЖ М. И., канд. техн. наук

На крупных промышленных подстанциях доля токов от синхронных электродвигателей (СД) при к. з. зачастую достигает 30—50 % общего тока к. з. Правильный учет этих токов имеет весьма существенное значение для определения коммутационной способности аппаратов и, что самое главное, для правильного учета теплового импульса и термической стойкости аппаратов и проводников.

По принятой методике (например [1] и др.), а также в соответствии с ГОСТ 27514-87 [2] ток к. з. от синхронных электродвигателей определяется как для синхронных генераторов.

Такая методика определения тока к. з., обозначенного I_{nt} , с учетом общепринятых допущений, достаточно точна для синхронных двигателей с электромашиными возбудителями, в том числе и с бесщеточной системой возбуждения. В настоящее время получили широкое применение тиристорные системы возбуждения, питание которых осуществляется от тех же шин, что и СД. (При наличии на подстанции двух раздельно работающих секций шин тиристорный возбудительный агрегат, как правило, питается от той же секции шин, что и СД, так как в противном случае вероятность нарушения устойчивой работы СД удваивается).

При к. з. на кабельных линиях, отходящих от шин подстанций, напряжение на шинах близко к нулю и питание тиристорного возбудительного агрегата прекращается. При более отдаленных к. з., когда остаточное напряжение на шинах подстанции составит 40—50 %, работа тиристорного возбудительного агрегата также прекратится из-за нарушения системы фазоимпульсного управления тиристорами. В этих случаях в токе к. з. от СД будут отсутствовать составляющие, обусловленные питанием обмотки возбуждения двигателя от независимого источника. Ток к. з. от СД будет определяться только затухающими токами в демпферных контурах и обмотке возбуждения, и периодическая составляющая этого тока может быть определена в виде

$$\left. \begin{aligned} I_{dni} &= \left(\frac{E'_{q101}}{X''_d + X_{вн}} - \frac{E'_{q101}}{X'_{d(1d)} + X_{вн}} \right) \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + \\ &+ \frac{E'_{q101}}{X'_{d(1d)} + X_{вн}} \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right); \\ I_{qnt} &= \frac{E'_{d101}}{X''_q + X_{вн}} \exp\left(-\frac{t}{T''_q}\right); \\ I_{nt} &= \sqrt{I_{dni}^2 + I_{qnt}^2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{где } E''_q &\approx E'' = \sqrt{(U_{101} + I_{101} X''_d \sin \varphi_{101})^2 + \\ &+ (I_{101} X''_d \cos \varphi_{101})^2} \approx U_{101} + I_{101} X''_d \sin \varphi_{101}; \\ E'_q &\approx E' = \sqrt{(U_{101} + I_{101} X'_{d(1d)} \sin \varphi_{101})^2 + (I_{101} X'_{d(1d)} \cos \varphi_{101})^2} \approx \\ &\approx U_{101} + I_{101} X'_{d(1d)} \cos \varphi_{101}; \\ E'_{d101} &= I_{101} X''_q \cos (\delta_{101} + \varphi_{101}); \end{aligned}$$

$$\delta_{101} = \arctg \frac{I_{101} X_q \cos \varphi_{101}}{U_{101} + I_{101} X_q \sin \varphi_{101}}.$$

Здесь величины U_{101} , I_{101} , φ_{101} и δ_{101} — соответственно напряжение, ток, фазовый угол и угол нагрузки двигателя в доаварийном режиме.

Параметры двигателя $X'_{d(1d)}$, X''_d , X'_q , X_q , T'_d , T''_d , T''_q определяются по каталожным данным с учетом указанной ГОСТ 27514-87.

Спротивление $X_{вн}$ представляет собой внешнее индуктивное сопротивление между выводами двигателя и точкой к. з.

Если через индуктивное сопротивление X_p протекает ток к месту к. з. только от одного двигателя или группы однотипных двигателей, которые в расчетной схеме заменяются одним двигателем общей мощности, то $X_{вн} = X_p$. Если через индуктивное сопротивление X_p протекает ток к месту к. з. от группы неоднотипных синхронных двигателей, то $X_{вн} = X_p \cdot X'_{di} / X'_{d\Sigma}$ [3], где $X'_{d\Sigma} =$

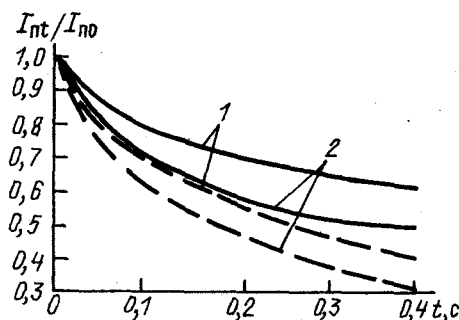
$$= 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{X'_{di}}.$$

Если же через индуктивное сопротивление x_p к месту к. з. помимо тока от синхронных двигателей протекает и ток от питающей энергосистемы, то $X'_{d\Sigma} =$

$$= 1 / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{X'_{di}} + \frac{1}{X_c} \right), \text{ где } X_c \text{ — индуктивное сопротивление питающей энергосистемы до точки соединения с } X_p.$$

В практических расчетах можно составляющую I_{qnt} не учитывать. Погрешность при этом, как правило, не превышает 1—2 %.

На рисунке представлены кривые $I_{nt}/I_{п0}$ для случая к. з. на выводах синхронных двигателей СМ-12000 и СТД-12500, построенные как по формуле, приведенной в ГОСТ 27514-87 и учитывающей наличие независимого источника питания обмотки возбуждения синхронного двигателя, так и по формуле (1) для синхронных дви-



Зависимости $I_{пт}/I_{по}$ от времени: 1 — для двигателей СТМ-12000 ($I_{поном}=9,0$); 2 — для двигателей STD-12500 ($I_{поном}=8,8$); — по формуле 5.2 ГОСТ 27514-87 для синхронного двигателя с независимым источником возбуждения; - - - по формуле (1) для синхронного двигателя с тиристорной системой возбуждения

гателей с тиристорной системой возбуждения. Как видно из приведенных кривых, при времени $t=0,1$ с (время

размыкания дугогасящих контактов выключателей на напряжения 6–10 кВ) значение тока, определенное по (1), на 10 % меньше подсчитанного по формуле, приведенной в ГОСТ 27514-87. При $t=0,2$ с разность уже превышает 20 %.

Формулой (1) для определения $I_{пт}$ можно пользоваться при условии, что остаточное напряжение на шинах, от которых питается синхронный двигатель, составляет $U_{ост} \leq 0,4$. При более удаленных к. з. следует учитывать ток возбуждения от возбудительного агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. — М.: Энергия, 1970.
2. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
3. Слодарж М. И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. — М.: Энергия, 1977.

[15.03.91]

УДК 537.523.4.001.6

Продольная неоднородность свечения сильноточного искрового канала

БОРИСОВ М. Ф., ЗОБОВ Е. А., ЛИТВИНОВА И. Г.

Неоднородность свечения распадающейся плазмы длинной искры и молнии, наблюдаемую многими авторами [1, 2] на временных развертках в виде полос, традиционно объясняют увеличением эффективной яркости наклонных по отношению к основному направлению разряда участков канала, часто принимающего зигзагообразную форму.

Появление изломов на разрядном канале вследствие опережающего возникновения искрового участка в одном из стримеров стримерной зоны до подхода головки канала от электрода [3] и последующего подключения этого участка через кратчайшую перемычку наглядно иллюстрируется картиной скользящего разряда, представленной на рис. 1.

Лабораторное моделирование длинной искры скользящим разрядом с управлением [4], предпринятое нами, показало, что неоднородность свечения не исчерпывается ракурсной модуляцией яркости [5]. На кинограмме свечения изломанного канала (рис. 2) хорошо видны возникающие в углах плазменные образования, выталкиваемые внутрь угла по биссектрисе. Размер и дальность выброса таких сгустков растут с увеличением разрядного тока свыше 1 кА, уменьшением угла излома и удлинением образующих этот угол сторон до нескольких сантиметров. Скругление вершины угла радиусом более 2 мм ослабляет выброс.

Для проверки влияния поверхности изломанный разряд воспроизводился в воздухе с помощью дополнительного электрода, подключенного через конденсатор малой емкости. При этом также наблюда-

лись выбросы внутрь угла, но пороговый ток их появления возрос в 2 раза, что, по-видимому, связано с пространственной извилистостью образующих плазменного угла при отсутствии линии управления.

По совокупности экспериментов с каналами различной геометрии и при разных режимах питания можно сделать вывод, что описанный эффект определяется только скоростью нарастания и амплитудой тока канала, но не зависит от обстоятельств, предшествующих возникновению искрового канала, например, от распределения полей в предпробойной фазе. Следует заметить, что электродинамическое взаимодействие скрещенных токов должно вызывать усилие противоположного направления. Наблюдаемый же эффект может быть объяснен преобладанием газодинамического взаимодействия оболочек канала, расширяющегося со скоростью несколько километров в секунду (рис. 3). На стадии возрастания разрядного тока происходит формирование кумулятивной струи (КС) и подсос плазмы вдоль канала разряда из ближайших окрестностей точки излома. Следует отметить, что авторы [6] наблюдали кумулятивную ударную волну в геометрическом центре кольцевого поверхностного разряда диаметром 10 см с энергией 100 Дж. Спутный поток газа за фронтом взаимодействующих ударных волн от смежных участков изломанного канала увлекает плазму в движение с начальной скоростью, близкой к звуковой. При этом формируются долгоживущие вихри с линейной скоростью вращения участков около 200 м/с, постепенно вбирающие в себя соседние участки канала. Их появление

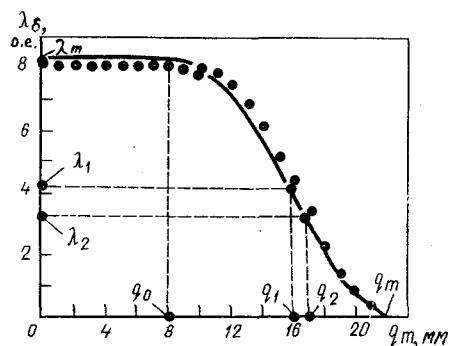
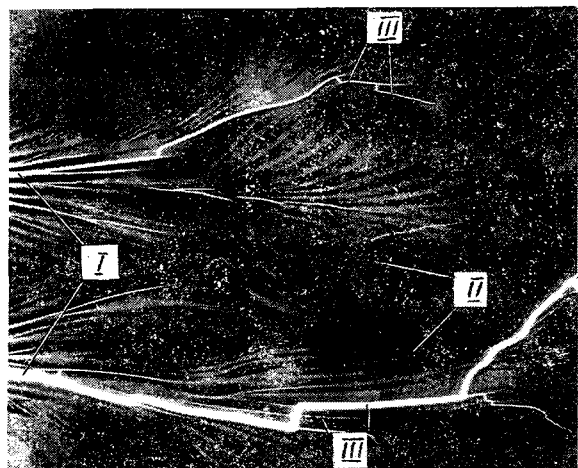


Рис. 1. Картина незавершенного скользящего разряда (масштаб 2:1, $U_{\text{имп}} = -50$ кВ): I — искровой канал от высоковольтного электрода; II — стримеры короны; III — искровые участки, возникшие из стримера и подключенные к каналу перемычкой

становится заметным после окончания импульса тока, поступательное движение продолжается, замедляясь, до 100 мкс, а вращение — в несколько раз дольше.

Таким образом, газодинамическое взаимодействие расположенных под углом участков разрядного канала вызывает образование долгоживущих плазменных сгустков. Их величина и дистанция выброса зависят от мощности и угла сближения взаимодействующих с плазмой ударных волн.

Так как реальный искровой канал в газе всегда можно представить составленным из изгибов и изломов различной величины, газодинамические процессы приводят к разложению его с течением времени на отдельные светящиеся элементы. Их вклад в продольную модуляцию свечения канала значительно превышает чисто ракурсный эффект, в чем легко убедиться, сравнивая свечение в начальной и последующих фазах существования канала.

Многие гипотезы возникновения шаровой молнии отводят место ее образования не в канале, а в периферийной зоне короны вокруг канала [7, 8], а некоторые используют газодинамический выброс плазмы канала в эту зону [9]. Для соответствия наблюдаемой энергоемкости шаровой молнии предполагают формирование активного вещества шара из многократно превосходящего объема короны [7, 8]. Этому могут способствовать выброс продуктов разряда из угла и образование вихря, втягивающего в себя возбуждаемые нами в лабораторном эксперименте.

Формирование излома по вышеописанному механизму наиболее вероятно при приближении головки канала

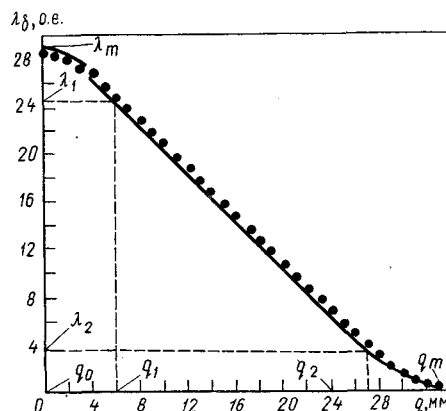
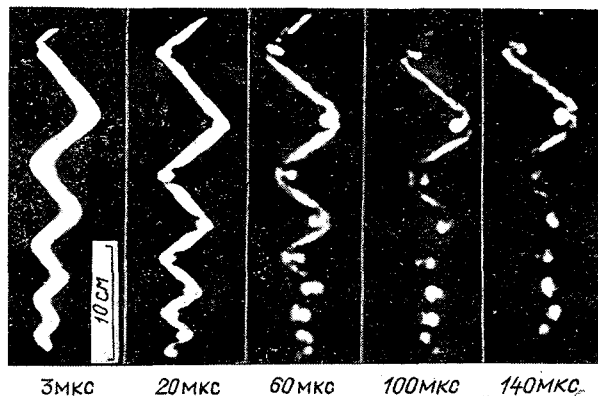


Рис. 2. Кинограмма свечения канала (масштаб 1:4, $J_{\text{имп}} = 1,5$ кА, под кадрами указано время после начала импульса тока)

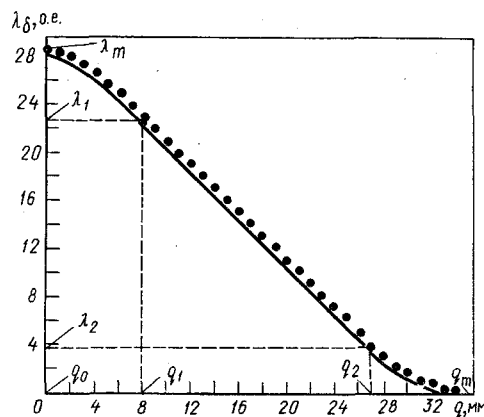
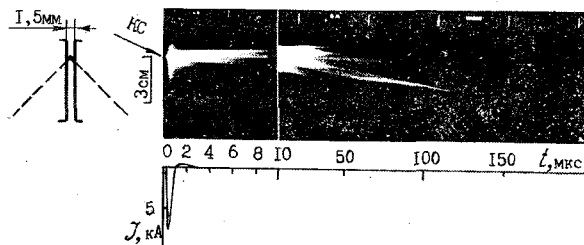


Рис. 3. Хронограмма свечения излома канала разряда, совмещенная с осциллограммой тока

к земле. В этой же области сквозному каналу предшествует самая высокая напряженность поля и наибольшая плотность стримеров, т. е. энергонасыщенность объема. Возможно, именно это определяет

чаще всего наблюдаемое возникновение шаровой молнии вблизи земли. Аналогичные процессы на регулярно расположенных изломах канала (см. рис. 2) могут вызвать послесвечение в виде четок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стекольников И. С., Беляков А. П. Экспериментальное изучение искрового разряда.— ЖЭТФ, 1938, т. 8, № 4.
2. Юман М. Молния.— М.: Мир, 1972.
3. Горин Б. Н., Шкилев А. В. Развитие электрического разряда в длинных промежутках стержень — плоскость при отрицательном импульсном напряжении.— Электричество, 1976, № 6.
4. Андреев С. И., Зобов Е. А., Сидоров А. Н. Метод управления развитием и формированием системы парал-

лельных каналов скользящих искр в воздухе при атмосферном давлении.— ПМТФ, 1978, № 3.

5. Зобов Е. А., Сидоров А. Н. Четочная структура разряда при пробое в неоднородном поле.— ПМТФ, 1990, № 1.

6. Газодинамические явления, сопутствующие кольцевому поверхностному разряду / И. К. Бережецкая, Е. Ф. Большаков, С. К. Голубев и др.— ЖЭТФ, 1984, т. 87, вып. 6 (12).

7. Стаханов И. П. О физической природе шаровой молнии.— Энергоиздат, 1985.

8. Александров В. Я., Голубев Е. М., Подмошенский И. В. Аэрозольная природа шаровой молнии.— ЖТФ, 1982, т. 52, вып. 10.

9. Смирнов Б. М. Возникновение шаровой молнии.— ДАН, 1976, т. 22, № 4.

[22.02.90]

УДК 621.318.124:538.24

О коэффициентах намагничивания и размагничивания ферромагнитных тел

ЗАХАРОВ В. А., канд. техн. наук

Физико-технический институт Уральского научного центра АН СССР

При расчете и анализе систем с ферромагнитными телами широкое распространение получили параметры, называемые коэффициентами намагничивания и размагничивания. Это безразмерные и в общем случае тензорные, величины, характеризующие соотношение между векторами напряженности поля магнетика \vec{H}_m (для коэффициента намагничивания $\langle K \rangle$) или «поля магнитных зарядов» («размагничивающего поля») \vec{H}_o (для коэффициента размагничивания $\langle N \rangle$) в какой-либо точке внутри магнитного тела и намагниченности \vec{M} магнетика в данной точке:

$$\vec{H}_m = \langle K \rangle \vec{M}; \quad (1)$$

$$\vec{H}_o = \langle N \rangle \vec{M}. \quad (2)$$

Как известно [1], в процессе намагничивания (перемангничивания) магнитных тел во внешнем магнитном поле в любой точке тела справедливы следующие выражения:

$$\vec{H} = \vec{H}_e + \vec{H}_m; \quad (3)$$

$$\vec{H}_i = \vec{H} - \vec{M}; \quad (4)$$

$$\vec{H}_i = \vec{H}_e + \vec{H}_o, \quad (5)$$

где \vec{H}_e — напряженность внешнего поля; \vec{H} — напряженность суммарного магнитного поля (внешнего и магнетика), а \vec{H}_i — напряженность «внутреннего поля» в рассматриваемой точке, причем

$$\vec{H}_o = \vec{H}_m - \vec{M}. \quad (6)$$

Здесь $\vec{H}_e = \vec{B}/\mu_0$, $\vec{H}_m = \vec{B}_m/\mu_0$ и $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0$, где \vec{B}_e , \vec{B}_m и \vec{B} — индукция внешнего магнитного поля, поля магнетика и суммарного соответственно; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Если магнитное поле представлено изотропным магнетиком, то в тех его объемах, где происходит «осевое» перемангничивание магнетика (векторы \vec{H}_e , \vec{M} и \vec{H}_m остаются параллельными при перемангничивании), уравнения (3)—(6) могут быть выражены через скаляр-

ные величины, при этом коэффициенты намагничивания K и размагничивания (N) соответственно равны:

$$K = H_m/M; \quad (7)$$

$$N = H_o/M. \quad (8)$$

Для тел в виде эллипсоида вращения, ориентированных осью вращения вдоль однородного внешнего поля, коэффициенты K и N постоянны в любой точке тела и не зависят ни от характеристик материала, ни от режима перемангничивания. На рис. 1 показаны кривые изменения параметров магнитного поля при перемангничивании предварительно намагниченного (например, до технического насыщения) эллипсоида вращения из ферромагнитного материала. Последний представлен кривыми перемангничивания материала по петле гистерезиса $M(H_i)$ и $H(H_i)$. Здесь же дана вспомогательная прямая для напряженности внешнего поля, поскольку параметр H_e необходимо откладывать как по оси абсцисс [в соответствии с выражением (5)], так и по оси ординат [в соответствии с уравнением (3)]. Соотношение масштабов по осям координат выбрано условно 1:5, поэтому прямая H_e проходит под углом, не равным 45° . Графические построения, в частности получение кривой зависимости H_m от H_i , проведены для $K=0,8$ ($N=-0,2$).

Точка 1 на оси абсцисс соответствует некоторому текущему значению H_{e1} напряженности внешнего магнитного поля, убывающего от максимального значения, соответствующего намагничиванию, до нуля. При этом в любой точке эллипсоида «внутреннее поле» равно H_{i1} ; соответственно намагниченность, напряженность поля магнетика и напряженность суммарного магнитного поля — M_1 , H_{m1} и H_1 . Напряженность «поля магнитных зарядов» равна $H_{o1} = H_{i1} - H_{e1}$ и поле направлено навстречу внешнему (является как бы «размагничивающим»), а угол α между лучом, проведенным пунктиром из точки 1' на кривой $M(H_i)$ в точку 1, и осью ординат пропорционален коэффициенту размаг-

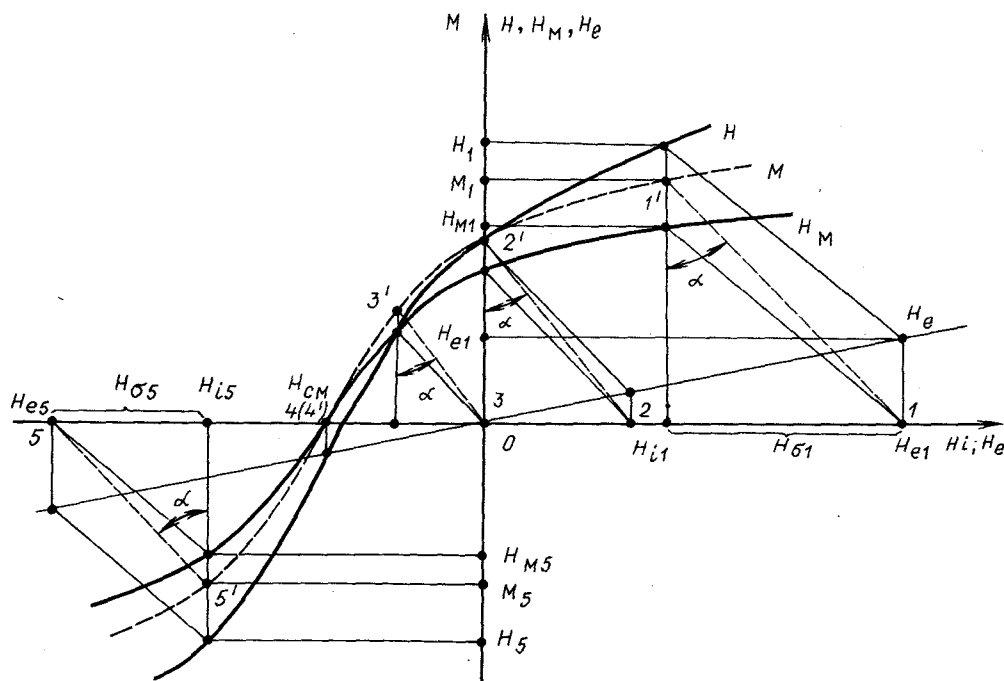


Рис. 1. Кривые перемагничивания $M(H_i)$, $H(H_i)$ и $H_m(H_i)$ ферромагнитного эллипсоида вращения

ничивания N эллипсоида (с учетом масштабов по осям координат $N = H_{\sigma 1}/M_1 = -0,2$).

Соответствующие построения в точке 2 характеризуют состояние магнитного тела, при котором напряженность «внутреннего поля» в нем равна нулю ($H_{i2} = 0$), $H_{\sigma 2} = -H_{e2}$, $H_2 = M_2$.

При $H_e = 0$ (точка 3 — начало координат) магнетик характеризуется параметрами остаточного намагничивания: $H_{\sigma 3} = H_{i3}$, $H_3 = H_{m3}$.

При изменении полярности внешнего поля ($H_e < 0$) магнетик перемагничивается по спинке петли гистерезиса. Точка 4 (она же — 4') характеризует состояние магнетика, когда намагниченность в нем равна нулю ($M_4 = 0$); соответственно $H_{m4} = 0$, а напряженность внешнего поля равна напряженности «внутреннего поля» ($H_{e4} = H_{i4}$) и представляет собой коэрцитивную силу по намагниченности H_{cm} магнетика. В данной точке коэффициенты K и N не определены, так как $M_4 = H_{m4} = -H_{\sigma 4} = 0$.

Дальнейшее увеличение напряженности внешнего поля соответствует намагничиванию тела в направлении, противоположном первоначальному, и построения, например в точке 5, аналогичны построениям в точке 1. Так, напряженности внешнего поля H_{e5} (точка 5) соответствуют напряженность «внутреннего поля» H_{i5} , намагниченность M_5 и т. д. «Поле магнитных зарядов» по-прежнему направлено навстречу внешнему, т. е. является «размагничивающим», а тангенс угла α остается постоянным и равен $N = H_{e5}/M_5 = -0,2$.

Если форма «разомкнутого» магнитного тела отличается от эллипсоида вращения, то, как известно [2], коэффициенты K и N зависят не только от соотношения размеров тела (например, соотношения длины цилиндрического стержня и его диаметра), но и от его магнитных характеристик даже при перемагничивании тела в однородном внешнем поле. Если же последнее неоднородно, а материал тела — ферромагнетик, то при его намагничивании из предварительно размагниченного состояния коэффициенты K и N могут изменяться (в общем случае) в следующих пределах [3]: $0 < K < 3$; $-1 < N < 1$.

Однако, как показывает практика перемагничивания ферромагнитных тел, коэффициенты K и N не ограничиваются указанными пределами. Рассмотрим, например, тело в форме прямоугольного параллелепипеда из изотропного ферромагнетика при перемагничивании его с помощью приставного устройства (ПУ), содержащего П-образный магнитопровод с установленной на нем катушкой (рис. 2, а). Во всех точках внутри тела, не лежащих в нейтральной плоскости ПУ, векторы напряженности \vec{H}_e внешнего магнитного поля (в данном случае — поля катушки и магнитопровода ПУ), намагниченности \vec{M} и напряженности поля магнетика \vec{H}_m не остаются коллинеарными в процессе перемагничивания, а поворачиваются, одновременно изменяясь по величине.

Так, если в точке А на рис. 2, а намагниченность в режиме намагничивания представлена вектором \vec{M}_n , то в состоянии, когда ток в катушке ПУ выключен (остаточное намагничение системы «ПУ — тело»), вектор намагниченности занимает положение \vec{M}_0 . При перемагничивании (ток в катушке противоположен намагничивающему) вектор \vec{M} продолжает поворачиваться по часовой стрелке и при токе, равном по величине току первоначального намагничивания, становится антипараллельным вектору \vec{M}_n (вектор \vec{M}_n на рис. 2, а). Другими словами, в этой точке магнитного тела происходит «вращательное» перемагничивание магнетика. При анализе такого процесса не применимы истинные характеристики материала магнетика, а коэффициенты намагничивания и размагничивания являются тензорными величинами.

С точки зрения исследования коэффициентов K и N как скалярных величин, наибольший интерес представляют те участки тела, которые расположены у его поверхности между полюсами магнитопровода, прежде всего участки вблизи нейтральной плоскости (точка Б на рис. 2). Процесс перемагничивания в них происходит без поворота векторов \vec{H}_e , \vec{M} и \vec{H}_m («осевое» перемагничивание магнетика), поэтому при анализе процесса возможно использование характеристик ферромагнетика как материала, задаваемых в виде кри-

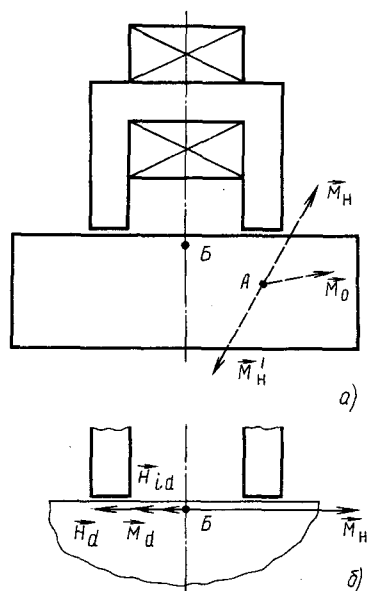


Рис. 2. Перемагничивание ферромагнитного тела приставным устройством (ПУ) с П-образным магнитопроводом: а — в точке А, не лежащей в нейтральной плоскости ПУ; б — в точке В приповерхностного участка нейтрального сечения

вых перемагничивания $M(H_i)$ и $H(H_i)$, а также понятий коэффициентов K и N , соответствующих формулам (7) и (8).

Можно было бы предположить, что процесс перемагничивания тела в данном случае аналогичен тому, что происходит в рассматриваемых участках тела при воздействии на него однородного внешнего поля (например, при установке тела внутрь соленоида вдоль его оси). В последнем случае, как известно, ферромагнитные стержни (цилиндрические или в форме прямоугольного параллелепипеда) подобны эллипсоидам вращения, отличаясь от них только непостоянством коэффициентов K и N по длине и сечению стержней (при этом в расчетах используются усредненные по нейтральному сечению коэффициенты — «центральные» коэффициенты намагничивания и размагничивания) и их значением при одинаковой с эллипсоидом относительной длине. В частности, после намагничивания стержня в однородном поле и «выключения» поля состояние магнетика в нейтральном сечении характеризуется точкой на спинке петли гистерезиса $M(H_i)$ во втором квадранте аналогично тому, как показано на рис. 1 (точка 3); при этом угол α пропорционален «центральному» коэффициенту размагничивания $N_{\text{ц}}$ стержня в режиме его остаточного намагничивания. По крайней мере, усредненное по сечению значение «внутреннего поля» H_i , соответствующее этому состоянию, меньше коэрцитивной силы $H_{\text{см}}$.

Однако при намагничивании тех же стержней приставным устройством картина поля становится существенно асимметричной, а резкая неоднородность поля по нейтральному сечению тела делает бессмысленным усреднение параметров по всему этому сечению, особенно в режиме перемагничивания. Поэтому здесь нужен анализ локальных («точечных») параметров магнитного поля. Весьма характерным для рассматриваемой системы «ПУ — тело» является то, что в ряде случаев напряженность «внутреннего поля» приповерхностных участков тела, лежащих в нейтральной плоскости между полюсами ПУ, при его остаточном намагничении превышает коэрцитивную силу $H_{\text{см}}$ материала. В частности, это происходит тогда, когда размеры

перемагничиваемого с помощью ПУ тела превышают соответствующие размеры полюсов магнитопровода (рис. 2, а).

Измерения показывают, что напряженность «внутреннего поля» в точке В (рис. 2, б) при остаточном намагничении системы (ток в катушке ПУ выключен) может превышать $H_{\text{см}}$ материала на десятки процентов, несмотря на то что напряженность внешнего поля в этом состоянии еще не равна нулю, а подмагничивает тело за счет остаточной намагненности сердечника магнитопровода. При подаче в катушку ПУ тока размагничивания происходит дальнейшее увеличение напряженности «внутреннего поля».

Это означает, что намагненность магнетика в точке В уже при остаточном намагничении системы оказывается направленной встречно намагненности $M_{\text{н}}$ при намагничивании, а рабочая точка на петле гистерезиса $M(H_i)$ из второго квадранта (что имеет место для состояния остаточного намагничения эллипсоида вращения) перемещается в третий квадрант. Аналогичная ситуация наблюдается в теле и при удалении ПУ после выключения намагничивающего тока [4]. Поскольку характеристики $M(H_i)$ и $H(H_i)$ материала «жестко привязаны» друг к другу, то указанное перемещение рабочей точки можно объяснить только смещением характеристики $H_{\text{н}}(H_i)$ по отношению к кривой $M(H_i)$, что, в свою очередь, обусловлено воздействием на магнетик вблизи точки В других, удаленных от поверхности, намагненных частей тела.

На рис. 3, а показан процесс перемагничивания магнетика вблизи точки В тела для рассматриваемого случая, причем характеристики материала $M(H_i)$ и $H(H_i)$ те же, что и у описанного ранее эллипсоида вращения, а на рис. 3, б представлена зависимость коэффициентов K и N от напряженности «внутреннего поля» H_i при перемагничивании.

Пусть напряженность внешнего магнитного поля (в данном случае, как указывалось, это суммарное поле, создаваемое катушкой ПУ и его магнитопроводом) уменьшается от некоторого максимального значения, соответствующего намагничиванию, до нуля. При напряженности внешнего поля H_{e1} (точка 1 на оси абсцисс) напряженность «внутреннего поля» $H_{i1}=0$. Соответственно напряженность «поля магнитных зарядов» $H_{s1}=-H_{e1}$, а угол α_1 между лучом, проведенным из точки 1' на кривой $M(H_i)$ в точку 1, и осью ординат пропорционален коэффициенту размагничивания $N_1(K_1 \text{ и } N_1 \text{ для этого состояния показаны точками на рис. 3, б})$.

При некотором значении $H_e=H_{e2}$ (точка 2) напряженность «внутреннего поля» H_{i2} соответствует $H_{\text{н}}=0$ и лежит в интервале от нуля до $H_{\text{см}}$; значения коэффициентов намагничивания и размагничивания: $K_2=0$ и $N_2=-1$ (соответственно угол α_2 на рис. 3, а). Напряженность «внутреннего поля» становится равным $H_{\text{см}}$ при $H_e=H_{e3}$ (точка 3). Как видно из рисунка, по мере приближения к этому состоянию намагненность M стремится к нулю, а поскольку при этом $H_{\text{н}}<0$, то коэффициенты K и N стремятся к $-\infty$ (угол α стремится к $\alpha_3=90^\circ$). После точки 3', где $|H_i|>H_{\text{см}}$, а $M<0$, коэффициенты K и N уменьшаются от бесконечно больших положительных значений и при $H_e=H_{e4}=0$ (точка 4 — начало координат) приобретают значения K_4 и N_4 , соответствующие состоянию остаточного намагничения. В этом состоянии векторы \vec{M}_d , $\vec{H}_d=\vec{H}_{\text{нд}}$ и $\vec{H}_{\text{ид}}$ в точке В тела (рис. 2, б) направлены в противоположную от направления намагничивания сторону (намагниченность $M_{\text{н}}$ в точке В при намагничивании показана пунктиром), $\vec{H}_{\text{од}}=\vec{H}_{\text{ид}}$, а угол α_4 на рис. 3, а пропорционален коэффициенту размагничивания $N_4=H_{\text{од}}/M_d$.

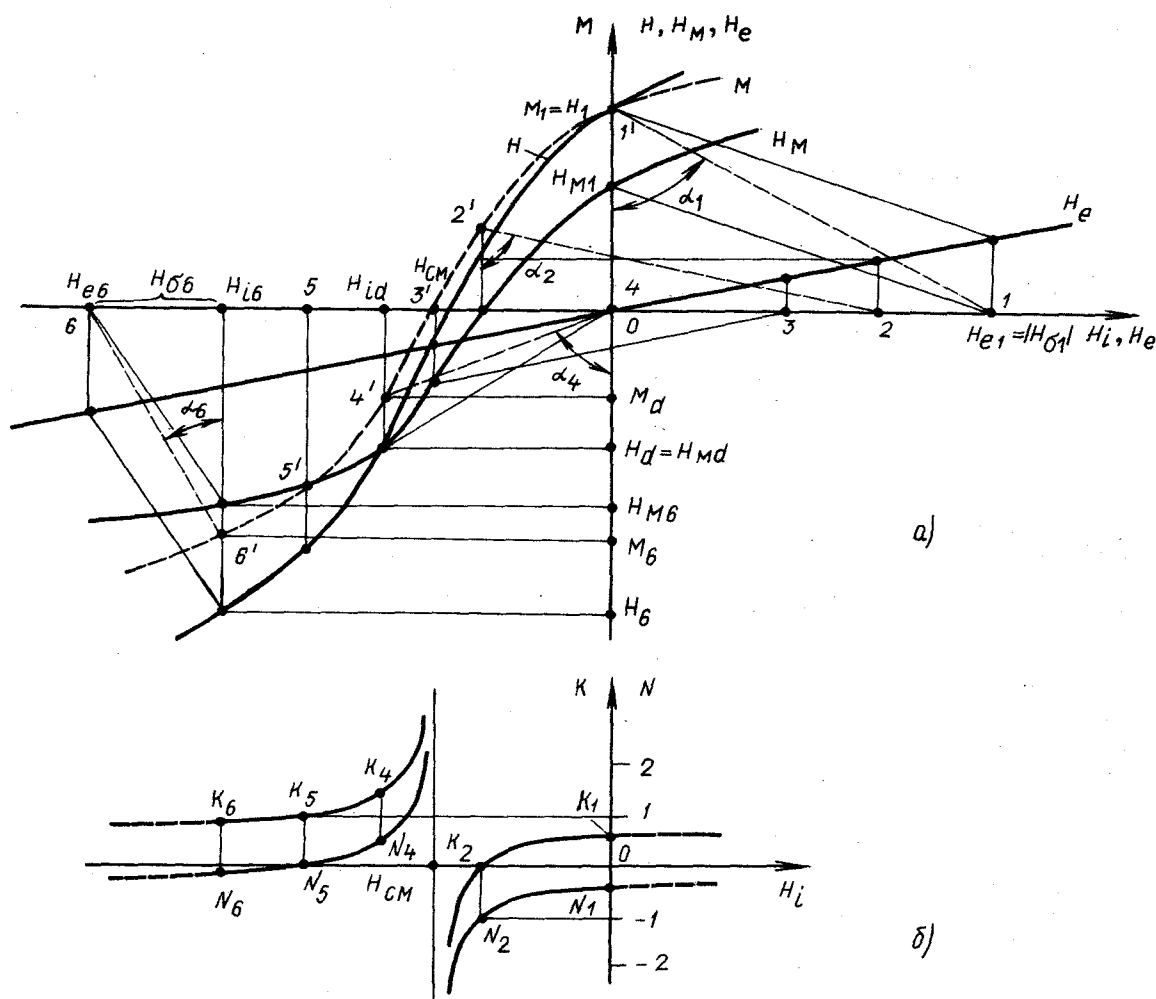


Рис. 3. Процесс изменения магнитных параметров в точке Б тела:

а — кривые перемагничивания $M(H_i)$, $H(H_i)$ и $H_m(H_i)$; б — зависимость коэффициентов K и N от «внутреннего поля» H_i

С изменением направления внешнего поля ($H_e < 0$) коэффициенты K и N продолжают уменьшаться и при некоторой напряженности внешнего поля $H_{e5} = H_{i5}$ становятся равными $K_5 = 1$, $N_5 = 0$ (угол $\alpha_5 = 0$).

Затем происходит дальнейшее намагничивание тела в направлении, противоположном первоначальному намагничиванию, а коэффициенты K и N , уменьшаясь, приближаются к значениям, соответствующим максимальной напряженности внешнего поля при намагничивании. В промежуточном состоянии, в частности при $H_e = H_{e6}$ (точка б) $K_6 = H_{m6}/M_6 < 1$, а $N_6 = H_{e6}/M_6 = \tan \alpha_6 < 0$.

Таким образом, в процессе перемагничивания тел из ферромагнетика коэффициенты намагничивания и размагничивания в отдельных частях тела могут принимать значения в интервале от $-\infty$ до $+\infty$. Как видно из рис. 3, это происходит во всех случаях, когда переход значений H_m через нуль не совпадает с нулевым значением M . При этом напряженность «внутреннего поля» приповерхностных областей тела в состоянии его остаточного намагничивания H_{id} может быть как меньше, так и больше H_{cm} ; когда

$H_{id} = H_{cm}$, то коэффициенты K и N становятся бесконечно большими. Это, по-видимому, происходит даже тогда, когда тело в виде стержня перемагничивается в однородном внешнем поле, не говоря уже о более сложных случаях перемагничивания, например таких, как перемагничивание с помощью приставных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В. А. Магнитостатика систем с ферромагнетиками. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. — 95 с.
2. Антонов В. Г., Чечурина Е. Н. Способы экспериментального определения коэффициентов размагничивания ферромагнитных стержней. — «Исследования в области магнитных измерений» / Тр. метрологических институтов СССР. 1974, вып. 152 (212). — Л.: ВНИИМ, с. 120—129.
3. Захаров В. А. О физическом смысле и пределах изменения коэффициента намагничивания K . — М.: ВИНТИ, 1980, № 5202-80-Деп.
4. Табачник В. П., Чернова Г. С., Федорищева Э. Э. Остаточное поле пластин, намагниченных двухполюсным электромагнитом. — Дефектоскопия, 1990, № 4, с. 72—76.

[26.03.91]

Об интегральных уравнениях электродинамики в задаче рассеяния Н-поляризованного поля на цилиндрической оболочке

СУДОВ Н. Л., ШПИЦБЕРГ В. Е

Ленинград

При решении ряда технических задач возникает необходимость расчета характеристик электромагнитного поля (ЭМП), рассеянного на тонкостенных цилиндрических конструкциях. Известные алгоритмы решения этой задачи ограничены приближениями идеальной проводимости или квазистатики. В противном случае они приводят к громоздким численным расчетам [1, 2]. В данной статье при более широких предположениях получено интегральное уравнение для средних значений касательных составляющих векторов ЭМП в материале слоя и показано, что задача о рассеянии Н-поляризованной волны как на замкнутой, так и разомкнутой цилиндрической оболочке с конечными электромагнитными параметрами может быть решена на основе его сведения к системе алгебраических уравнений.

Для вывода уравнений ЭМП в применении к геометрически тонкой оболочке воспользуемся приближенными граничными условиями [3]:

$$\left. \begin{aligned} n \cdot E^+ - n \cdot E^- &= -h^* \epsilon'_m \operatorname{div}_s E_\tau; \\ n \cdot H^+ - n \cdot H^- &= -h^* \mu_m \operatorname{div}_s H_\tau; \\ n \times E^+ - n \times E^- &= i\omega \mu_0 h^* \mu_m H_\tau; \\ n \times H^+ - n \times H^- &= -i\omega \epsilon_0 h^* \epsilon'_m E_\tau, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $h^* = 2/ktg(kh/2)$ — эффективная толщина оболочки; h — ее геометрическая толщина; индексы $+$ и $-$ указывают на принадлежность величины к соответствующей лицевой поверхности оболочки S^+ или S^- ; n — орт нормали; div_s — оператор поверхностной дивергенции; касательные составляющие ЭМП на поверхности оболочки определяются как $W_\tau^\pm = P_s W^\pm = [n \times W^\pm]_n$, $W_\tau = (W_\tau^+ + W_\tau^-)/2$, $W = H \vee E$; P_s — оператор проекции; $k = k_0 \sqrt{\epsilon'_m \mu_m}$ — волновое число в материале слоя; μ_m и $\epsilon'_m \epsilon_m + i\sigma/\omega \epsilon_0$ — его относительные магнитная и комплексная диэлектрическая проницаемости; ϵ_m — относительная диэлектрическая проницаемость; σ — удельная электрическая проводимость; $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ — волновое число среды, электродинамические свойства которой описываются абсолютными магнитной и диэлектрической проницаемостями μ_0 и ϵ_0 ; ω — круговая частота.

Заметим, что в силу геометрии задачи для Н-поляризованного поля

$$\operatorname{div}_s E_\tau = 0; \quad (2)$$

$$\operatorname{div}_s H_\tau = \partial H_\tau / \partial \tau. \quad (3)$$

В этом случае на наружной и внутренней сторонах замкнутого контура L , аппроксимирующего оболочку,

можно записать следующие соотношения Стреттона — Чу [4] для магнитного поля:

$$\begin{aligned} H^+(\tau) &= 2H^-(\tau) + \frac{1}{2\pi} \int_L \left\{ \mp i\omega \epsilon_0 n(\tau') \times E^\pm(\tau') G(\tau, \tau') \pm \right. \\ &\quad \left. \pm [n(\tau') \times H^\pm(\tau')] \times e'_\tau \frac{\partial G}{\partial \tau'}(\tau, \tau') \pm n(\tau') \cdot H^\pm(\tau') \times \right. \\ &\quad \left. \times e'_\tau \frac{\partial G}{\partial \tau'}(\tau, \tau') \right\} dL', \end{aligned} \quad (4)$$

где функция Грина $G(\tau, \tau') = i\pi H_0^{(1)}(k_0|\tau - \tau'|)$ имеет логарифмическую особенность при $k_0 \rightarrow 0$: $G \rightarrow -2 \ln(\gamma k_0 |\tau - \tau'|/2)$; τ и τ' — радиусы-векторы точек наблюдения и интегрирования; γ — постоянная Эйлера; H_0^\pm — исходное поле источников, расположенных вне и внутри контура L .

Вычитая почленно соотношения (4), заданные на лицевых поверхностях S^+ и S^- , и используя граничные условия (1), которые определяют величину скачка ЭМП между этими поверхностями, можно получить следующее интегральное соотношение:

$$\begin{aligned} H(\tau) &= H^0(\tau) + \frac{1}{4\pi} \int_L \left\{ k_0^2 h^* \mu_m H_\tau(\tau') G(\tau, \tau') - \right. \\ &\quad \left. - i\omega \epsilon_0 h^* \epsilon'_m E_\tau(\tau') \times e'_\tau \frac{\partial G}{\partial \tau'}(\tau, \tau') - \right. \\ &\quad \left. - h^* \mu_m \frac{\partial H_\tau}{\partial \tau'} e'_\tau \frac{\partial G}{\partial \tau'} \right\} dL', \quad \tau \in L, \end{aligned} \quad (5)$$

связывающие средние значения касательных компонент поля в материале слоя. При этом необходимо учесть, что нормальная к поверхности оболочки составляющая выражения (5) может быть с помощью уравнений Максвелла выражена через касательную компоненту электрического поля [4]:

$$n \cdot H = \frac{i}{\omega \mu_0} \operatorname{div}_s n \times E. \quad (6)$$

Область применимости уравнения (5) определяется совокупностью ограничений, при которых выведены приближенные граничные условия (1). Эти ограничения, физический смысл которых состоит в требовании, чтобы поле внутри слоя независимо от его структуры вне оболочки было подобно полю плоской волны, распространяющейся вдоль нормали, для геометрически тонких пологих слоев можно представить в следующем виде [5]:

$$\begin{aligned} |\epsilon'_m| \gg 1, \mu_m \gg 1 \quad \text{при } |kh| < 1; \\ |\epsilon'_m \mu_m| \gg 1 \quad \text{при } |kh| > 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Характер действия ограничений (7) иллюстрирует рис. 1, на котором представлена зависимость от $|kh|$ (при различных μ_m) относительной погрешности Δ определения коэффициента обратного действия круговой цилиндрической оболочки (толщина стенки $h = 2$ мм, радиус $a = 1$ м, $\sigma = 7 \cdot 10^6$ См/м) в поперечном магнитном поле, полученного с использованием аналитического решения уравнений (2), (5).

Для незамкнутой оболочки уравнения (2), (5) должны быть дополнены краевыми условиями. В данном слу-

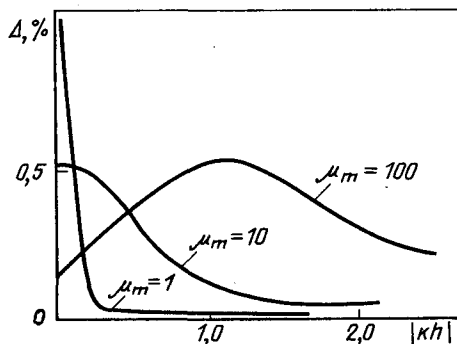


Рис. 1

чае использовались условия, найденные из характера поведения решений уравнения Максвелла около края импедансной полуплоскости [6]:

$$H_\tau \cdot n^*|_{\partial L} = 0; E_\tau \cdot n^*|_{\partial L} = 0, \quad (8)$$

где n^* — внешняя нормаль к граничным точкам ∂L контура L .

По найденным функциям h^*E_τ и h^*H_τ , которые пропорциональны средним по толщине слоя значениям касательных составляющих электрического и магнитного поля, можно вычислить пространственное распределение рассеянного поля:

$$H^s(r) = \frac{1}{2\pi} \int_L \left\{ k_0^2 h^* \mu_m H_\tau(\tau') G(r, \tau') - i\omega \varepsilon_0 h^* \varepsilon'_m E_\tau(\tau') \times \right. \\ \left. \times \nabla' G(r, \tau') - h^* \mu_m \frac{\partial H_\tau}{\partial \tau'} \nabla' G(r, \tau') \right\} dL', \quad r \in L; \quad (9)$$

$$E^s(r) = \frac{1}{2\pi} \int_L \left\{ k_0^2 h^* \varepsilon'_m E_\tau(\tau') G(r, \tau') + i\omega \mu_0 h^* \mu_m H_\tau(\tau') \times \right. \\ \left. \times \nabla' G(r, \tau') \right\} dL', \quad r \in L. \quad (10)$$

Выражения (9), (10) получены на основе граничных условий (1) так же, как и уравнение (5).

Уравнения (2), (5), (6) решались методом граничных элементов. В качестве неизвестных использовались средние значения компонент поля на j -м отрезке контура L . Дополненная условием обращения в нуль на краю слоя нормальных составляющих компонент поля (8) соответствующая система алгебраических уравнений имеет вид

$$\left. \begin{aligned} H_j + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N \frac{\delta_k}{\delta_j} h_k^* \mu_{mk} H_k \left\{ \frac{(x_{0j+1} - x_k) c_k + (y_{0j+1} - y_k) s_k}{(x_{0j+1} - x_k)^2 + (y_{0j+1} - y_k)^2} - \right. \\ \left. - \frac{(x_{0j} - x_k) c_k + (y_{0j} - y_k) s_k}{(x_{0j} - x_k)^2 + (y_{0j} - y_k)^2} \right\} - \frac{1}{2\pi} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N \delta_k h_k^* \sigma_k E_k \times \\ \times \frac{(x_k - x_j) s_j - (y_k - y_j) c_j}{(x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2} = H_j^{0\tau}, \quad j = 1, \dots, N; \\ E_j \left[1 + \frac{i\omega \mu_0}{2\pi} \sigma_j h_j^* \delta_j (\ln \delta_j / 2 - 1) \right] + \\ + \frac{i\omega \mu_0}{4\pi} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N h_k^* \sigma_k E_k \ln[(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2] - \\ - \frac{i\omega \mu_0}{2\pi} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N \delta_k h_k^* \mu_{mk} H_k \frac{(x_j - x_k) s_k - (y_j - y_k) c_k}{(x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2} = \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

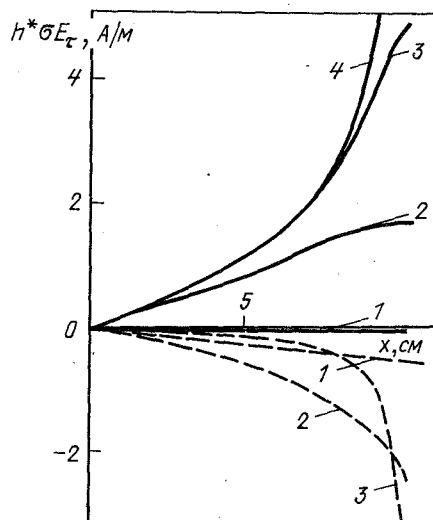


Рис. 2

$$\left. \begin{aligned} = E_{01}^0 - i\omega \mu_0 \left[\sum_{k=1}^j \delta_k H_k^{0,n} - \delta_j H_j^{0,n} / 2 \right], \quad j = 1, \dots, N; \\ \sum_{k=1}^N E_k \delta_k h_k^* \sigma_k = 0, \end{aligned} \right\}$$

где $\tau_k(x_k, y_k)$ характеризует положение середины участка контура L с номером k , соединяющего узловые точки $\tau_{0k}(x_{0k}, y_{0k})$ и $\tau_{0k+1}(x_{0k+1}, y_{0k+1})$; c_k, s_k — направляющие косинусы и синусы отрезка L_k ; H_j, E_j — средние значения касательных составляющих магнитного и электрического полей H_τ, E_τ на L_j длиной δ_j ; $H_j^{0,\tau}$ и $H_j^{0,n}$ — средние значения касательной и нормальной составляющих исходного поля на L_j . Отметим, что при $\omega=0$ эта система совпадает с системой алгебраических уравнений, полученной в [7] при решении аналогичной магнитной задачи.

В качестве примера использования системы (11) в таблице приведены результаты вычисления коэффициентов экранирования плоской волны цилиндрической оболочки с толщиной стенок 1 мм, радиусом 10 см в зависимости от числа разбиения N ее контура L на равные отрезки $\{L_j\}_{j=1}^N$. Выбранные в таблице частоты соответствуют случаям как большой (100 Гц), так и малой (1 кГц) глубины скин-слоя материала оболочки по сравнению с ее толщиной. Рассмотрена также металлическая полоса шириной 20 см при $h=1$ мм, $\sigma=5 \cdot 10^6$ См/м, $\mu_m=100$.

На рис. 2 (при $N=32$) представлено распределение плотности тока $h^* \sigma E$, индуцированного нормальным к пластине магнитным полем. Сплошными и пунктирными линиями обозначены вещественная и мнимая части тока. На этом рисунке кривые 1—3 соответствуют частотам 0,1, 1 и 10 кГц и охватывают соотношения между толщиной полосы и глубиной скин-слоя ее материала, равные 0,44, 1,4 и 4,4. При этом кривые 1 с графической точностью совпадают с кривыми, полученными в [8] при пренебрежении реакцией вихревых токов. Повышение частоты (кривые 2 и 3) приводит к концентрации тока на краях полосы, и его распределение стремится к некоторому предельному значению, характеризующемуся отсутствием сдвига фазы (кривая 4, рассчитанная для частоты 100 мГц), которое практически совпадает с распределением тока на идеально проводящей полосе.

Вывод. Получена система интегральных уравнений, позволяющая в широком диапазоне частот выполнять расчеты H -поляризованного электромагнитного поля с учетом влияния тонких цилиндрических оболочек.

$\omega/2\pi$	N	Коэффициенты экранирования	
		$\mu_m=1, \sigma=34 \cdot 10^6$ См/м	$\mu_m=100, \sigma=5 \cdot 10^6$ См/м
100 Гц	8	0,6218	0,6095
	16	0,6038	0,6406
	32	0,5980	0,6473
	Точно	0,5938	0,6473
1 кГц	8	0,0938	0,2763
	16	0,0790	0,2621
	32	0,0755	0,2571
	Точно	0,0738	0,2525

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панасюк В. В., Саврук М. П., Назарчук З. Т. Метод сингулярных интегральных уравнений в двумерных задачах дифракции. — Киев: Наукова думка, 1984.
2. Краснов И. П. Расчетные методы судового магнетизма и электротехники. — Л.: Судостроение, 1986.
3. Шпицберг В. Е. О приближенных граничных условиях электродинамики для тонких экранов. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1980, № 1.
4. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике. — М.: Мир, 1977.
5. Судов Н. Л. О граничных условиях электродинамики

для тонких металлических оболочек. — Радиоэлектроника, 1988, т. 33, № 2.

6. О поведении решения уравнения Максвелла вблизи ребра полуплоскости, на которой заданы двусторонние граничные условия импедансного типа / И. М. Бравер, Х. Л. Гарб, П. Ш. Фридберг, И. М. Яковлев / ДАН СССР, 1986, т. 286, № 5.

7. Вишневский А. М., Лаповок А. Я. Алгоритм расчета поля намагничивания тонких пластин и оболочек. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1987, № 4.

8. Цейтлин Л. А. Вихревые токи в тонких пластинах и оболочках. — ЖТФ, 1969, т. 39, № 10.

[28.03.91]

УДК 536.42:621.365.5

Получение оптимального температурного распределения в раскатываемых кольцах с помощью индукционного подогрева

КОЛОМЕЙЦЕВА М. Б., ЧУГУЕВ И. В.

МЭИ

Во многих процессах металлообработки наличие определенного температурного поля часто является необходимым условием получения изделия с заданными свойствами и существенным фактором повышения производительности труда. Характерным примером является процесс индукционного подогрева раскатываемых колец. При этом требуется, управляя мощностью индуктора, получать заданное температурное поле Q^* в поперечном сечении кольца на входе в зону деформации в момент времени t_i , $i=0, \dots, i_{\max}$. Но так как чаще всего получить заданное температурное поле практически невозможно (объект неолностью управляем), то будем ставить задачу минимизации максимума отклонения получаемого температурного поля Q от заданного Q^* .

Момент t_i входа поперечного сечения кольца в зону деформации может быть фиксирован и не фиксирован. Общая формулировка поставленной задачи оптимального управления будет следующей:

$$\max_{\omega_0} |Q(r, z, t_i) - Q^*(r, z)| \Rightarrow \min, \quad i=0, \dots, i_{\max} \quad (1)$$

при условии, что функция распределения температуры в кольце $Q(r, z, t)$ является решением краевой задачи:

$$\left. \begin{aligned} c \frac{\partial Q}{\partial t} &= \operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} Q) + \omega_0 p, \\ R_1 \leq r \leq R_2, \quad 0 \leq z \leq H, \quad 0 \leq t \leq t_{\max} = T, \\ -\lambda \frac{\partial Q}{\partial n} &= f, \quad Q(r, z, 0) = Q_0, \quad \omega_0^{\min} \leq \omega_0(t) \leq \omega_0^{\max}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где r, z — пространственные координаты; t — временная координата; $R_1(t)$ и $R_2(t)$ — внутренний и внешний радиусы кольца; H — высота кольца; T — длительность всего технологического процесса; $\lambda(Q)$ — теплопроводность материала кольца; $c(Q)$ — теплоемкость единицы объема материала кольца; ω_0 — плотность внутренних источников на поверхности кольца с минимальным ω_0^{\min} и максимальным ω_0^{\max} значениями; $p(r, z)$ — нормированная функция распределения внутренних источ-

ников; Q_0 — начальная температура кольца; ω — угловая скорость вращения кольца; $f(r, z, t, \omega)$ — суммарная плотность теплового потока по нормали \vec{n} к поверхности кольца, учитывающая все особенности технологического процесса.

Управляющей функцией является плотность внутренних источников тепла на поверхности кольца $\omega_0(t)$, создаваемых индуктором.

Следует отметить, что управление должно быть оптимальным для любого поперечного сечения кольца. Ниже будет определяться оптимальное управление $\omega_0^{\text{opt}}(t)$ для некоторого произвольного сечения. Для других сечений это управление будет сдвинуто по фазе вследствие вращения кольца. Однако сдвиг по фазе оказывает влияние только на первом и последнем оборотах кольца. Но во время первого оборота это влияние мало в силу незначительности процесса теплопередачи по угловой координате и во время второго оборота по причине малости времени оборота кольца. Отсюда и следует оптимальность $\omega_0^{\text{opt}}(t)$ для всех поперечных сечений кольца.

Также отметим упрощение в задании нормированной функции распределения внутренних источников $p(r, z)$, которое заключается в игнорировании источников от деформации и выборе простого вида источников от индукционного нагрева. Это связано с тем, что корректное решение задачи механики сплошной среды и электромагнитной задачи требует учета многочисленных нюансов технологического процесса.

Весь технологический процесс состоит из двух этапов. Необходимость первого этапа связана с тем, что после нагрева в нагревательной установке кольцо транспортируется к раскатной машине и успевает несколько остыть. Поэтому может потребоваться подогрев вращающегося на раскатной машине кольца еще до начала раскатки. В связи с этим необходимо определить допустимые границы и условия такого подогрева. При этом рассмотрим варианты с разными начальными значениями температуры Q_0 . Во время первого этапа необходимо минимизировать максималь-

ное отклонение температуры Q от заданной Q^* . Это задача терминального управления со свободным правым концом. Момент t_0 в этом случае не фиксирован. Практически необходимо определить точки переключения t_0, t_0^1, \dots, t_0 управляющей функции $w_0(t)$ между w_0^{\min} и w_0^{\max} [1]. Формулировка задачи оптимального управления для первого этапа будет следующей:

$$\max_{t_0, t_0^1, \dots, t_0} |Q(r, z, t_0) - Q^*(r, z)| \rightarrow \min. \quad (3)$$

Во время второго этапа при активном формообразовании происходит значительное остывание кольца за счет теплообмена с окружающей средой и интенсивной теплоотдачи в раскатывающие валки. В этом случае также необходимо иметь допустимое распределение температуры при входе в зону деформации между раскатывающими валками в моменты времени t_1, \dots, t_{\max} , которые уже полностью определяются текущим внешним радиусом кольца $R_1(t)$, угловой скоростью вращения ω^{driv} и радиусом R^{driv} приводного раскатывающего вала, т. е. временем оборота кольца. Так как длительности времени нахождения поперечного сечения кольца в зоне индукционного нагрева на каждом обороте t_{ind} и его последующего перемещения вне зоны индукционного нагрева фиксированы, то можно управлять только мощностью индуктора. Поэтому для второго этапа имеем формулировку задачи оптимального управления:

$$\max_{\substack{w_0(t) = \text{const} \\ t_{i-1} \leq t \leq t_i}} |Q(r, z, t_i) - Q^*(r, z)| \rightarrow \min, \quad i = 1, \dots, i_{\max}. \quad (4)$$

Методика решения таких существенно нелинейных задач оптимизации [2] требует применения цифровой модели, которая позволяет рассчитывать температурное поле в сечении кольца при заданной мощности источника. Здесь использовался разработанный авторами пакет моделирования для численного решения трехмерного нелинейного уравнения теплопроводности в области кольцевой формы изменяющихся размеров при подвижном внутреннем источнике [3, 4]. С целью получения экономичной консервативной однородной разностной схемы были использованы метод дробных шагов [5] и интегро-интерполяционный метод [6]. Решение системы разностных уравнений осуществляется методом прогонки. Пакет моделирования написан на алгоритмических языках FORTRAN и Turbo Pascal. Взаимодействие с пользователем осуществляется посредством меню. Обеспечено графическое представление результатов моделирования.

Для первого этапа, исходя из простоты реализации, будем искать оптимальное управление для задачи (3) в классе двух интервальных управлений. Здесь необходимо отметить, что в течение первого интервала управления $0 \leq t \leq t_0$ при включенном индукторе каждое поперечное сечение кольца при его вращении периодически попадает в зону действия индуктора, т. е. для поперечного сечения плотность внутренних источников от индуктора представляет собой кусочно-постоянную функцию времени. Под числом интервалов управления подразумевается число интервалов постоянства напряжения на индукторе.

Были проведены расчеты для реального технологического процесса со следующими исходными данными: материал кольца — титановый сплав ВТ-20, $R_1(0) = 0,175$ м; $R_2(0) = 0,243$ м; $H = 0,065$ м; $Q^*(r, z) = 1000$ °С; $w_0^{\min} = 0$; $w_0^{\max} = 0,55 \cdot 10^9$ Вт/м³; $p(r, z) = \exp[-50 \cdot (R_2 - r)]$; длина индуктора $L_{\text{ind}} = 0,12$ м; $\omega^{\text{driv}} = 70$ об/мин; $R^{\text{driv}} = 0,3$ м. Ниже указаны результаты расчетов максимального отклонения распределе-

ния температуры Q от заданного Q^* при оптимальном управлении $w_0^{\text{opt}}(t)$, $0 \leq t \leq t_0$ в зависимости от начальной температуры кольца Q_0 :

Начальная температура Q_0 , °С	900	800	700
Момент включения индуктора t_0 , с	95	140	175
Момент окончания первого этапа t_0 , с	200	257	295
Максимальный перегрев, °С	238	271	283
Максимальное отклонение, °С	56	57	56

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает, что в выбранном классе управлений нельзя уменьшить неравномерность температурного поля ниже некоторого предела. Это связано в основном с сильным остыванием кольца на раскатной машине и неравномерным распределением в объеме кольца внутренних источников тепла от индуктора. Поэтому для получения более равномерного температурного распределения следует либо увеличивать число интервалов управления (7), либо совершенствовать индуктор и уменьшать потери тепла.

Для второго этапа при решении задачи (4) будем искать оптимальное значение плотности внутренних источников $w_0^{\text{opt}}(t)$ для каждого оборота кольцевой заготовки. Причем на каждом обороте будем решать одномерную задачу нелинейного программирования. Поскольку плотность внутренних источников на поверхности принадлежит ограниченному отрезку, то можно использовать метод «золотого сечения». К ранее приведенным исходным данным добавляются: $T - t_0 = 100$ с; $R_1(T) = 0,55$ Ом; $R_2(T) = 0,571$ м; $Q_0 = 1000$ °С. Результат решения задачи оптимального управления приведен на рис. 1.

Полученную функцию управления трудно реализовать практически. Поэтому предлагается другое, технически более приемлемое решение. Найдем оптимальное значение плотности внутренних источников на поверхности при установившемся стационарном температурном поле для кольца с фиксированными размерами. Проведя расчеты для нескольких значений размеров из диапазона их изменения при раскатке и далее интерполируя результаты, получаем зависимость квазиоптимального управления от геометрических размеров кольца. Поскольку в процессе раскатки высота кольца не изменяется, то внутренний и внешний радиусы связаны соотношением $R_2^2(t) - R_1^2(t) = \text{const}$. Поэтому целесообразно получить зависимость квазиоптимальной плотности внутренних источников на поверхности w_0^* от внешнего радиуса R_2 . Вычислительные эксперименты показали, что эта зависимость является практически линейной и при выбранных исходных данных имеет вид

$$w_0^*(R_2) = [0,662R_2(t) - 0,017] \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^3. \quad (5)$$

Пригодный для практического использования ква-

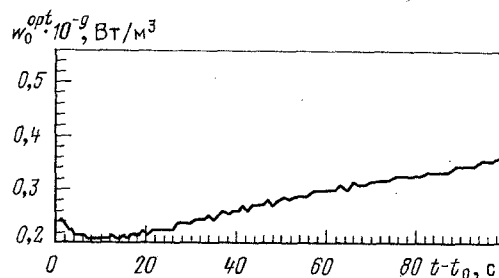


Рис. 1. Временная зависимость оптимальной плотности внутренних источников на поверхности w_0^{opt} для второго этапа при $t_0 \leq t \leq T$

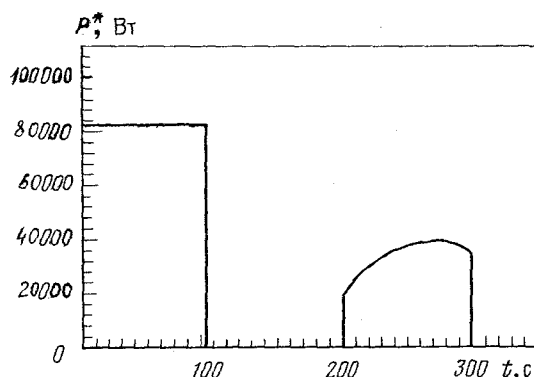


Рис. 2. Временная зависимость квазиоптимальной полезной мощности индуктора P^* для всего технологического процесса при $0 \leq t \leq T$

зиоптимальный закон изменения полезной мощности индуктора $P^*(t)$ определяется из (5) интегрированием по зоне нагрева:

$$P^*(t) = \int_0^{l_{\text{ind}}} \int_0^H \int_{R_1}^{R_2} \omega_0^* \cdot \exp[-50(R_2 - r)] \cdot dr \cdot dz \cdot dl \quad (6)$$

и представлен на рис. 2. Он имеет достаточно простой вид. Это позволяет использовать получаемые таким образом законы управления в реальных системах управления технологическими процессами [8, 9]. На рис. 3 показаны результаты моделирования при квазиоптимальном управлении для начальной температуры $Q_0 = 900^\circ\text{C}$

Выводы. 1. Задача оптимального управления с помощью индукционного подогрева температурным полем в раскатываемом кольце сформулирована как задача терминального управления со свободным правым концом.

2. Отмечены специфические особенности разных этапов технологического процесса раскатки.

3. Описан алгоритм решения задачи оптимизации на основе численных методов с использованием средств вычислительной техники.

4. Продемонстрирована методика использования пакета моделирования для решения задачи оптимального управления сложным нелинейным объектом с распределенными параметрами; приведены результаты расчетов для конкретного технологического процесса.

5. Получены оптимальные управляющие воздействия, пригодные для практической реализации в реальных системах управления технологическим процессом раскатки колец.

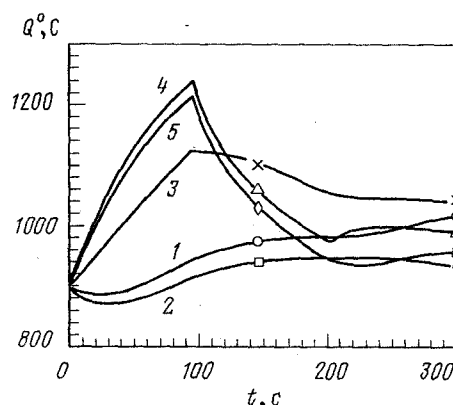


Рис. 3. Изменение во времени температуры в характерных точках поперечного сечения кольца: 1 — $r=R_1$, $z=0$; 2 — $r=R_1$, $z=H$; 3 — $r=(R_1+R_2)/2$, $z=H/2$; 4 — $r=R_2$, $z=0$; 5 — $r=R_2$, $z=H$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коломейцева М. Б. Анализ линейных систем автоматического регулирования. Учебное пособие. — М.: Изд. Московского энергетич. ин-та, 1977, с. 71—77.
2. Коломейцева М. Б., Панасенко С. А. Оптимизация нагрева массивных тел внутренними источниками. — Автоматика и телемеханика, 1976, № 4, с. 14—20.
3. Коломейцева М. Б., Пихлецкий В. В., Чугуев И. В. Трехмерная цифровая модель индукционного подогрева кольцевых заготовок в процессе горячей раскатки и ее использование для анализа распределений температуры / Московский энергетич. ин-т. Деп. рукопись. — М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1988, № 279 — тм88, с. 145.
4. Коломейцева М. Б., Пихлецкий В. В., Чугуев И. В. Численное моделирование и исследование процесса теплопередачи при индукционном подогреве раскатываемых кольцевых заготовок / Тез. докл. Всес. научн.-техн. конф. «Соврем. состоян., пробл. и персп. энергет. и технолог. в энергостр.» — Иваново, 1989, т. 1, с. 34.
5. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. — Новосибирск: Наука, 1967, 195 с.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983, 616 с.
7. Рапопорт Э. Я. Задача равномерного приближения при оптимизации распределенной системы, описываемой уравнением параболического типа. — Сиб. мат. журн., 1982, т. 23, № 5, с. 168—191.
8. Пихлецкий В. В., Чугуев И. В., Монсеенко С. М. Система управления процессом подогрева кольцевых заготовок во время раскатки / Тез. докл. Всес. научн. техн. конф. «Соврем. состоян., пробл. и персп. энергет. и технолог. в энергостр.» — Иваново, 1989, т. 2, с. 114.
9. Чугуев И. В. Система оптимального управления индукционным нагревом движущихся металлоизделий / Тез. докл. Междунар. конк. молод. научн. работн. «Роботика-89». — Созопол, Болгария, 1989.

[28.03.91]

Вниманию руководителей организаций и предприятий!

**Книжный магазин № 170 Москниги принимает
заказы и высылает наложенным платежом
красочные плакаты:**

По экономии электрической и тепловой энергии

1. Замена подшипников скольжения на шариковые сокращает расход электроэнергии на 12 %
2. Применяйте лампы ртутные, газоразрядные, криптоновые вместо ламп накаливания
3. Неполная нагрузка оборудования — перерасход энергии
4. Кончил работу — отключи оборудование
5. Будь бережлив — не перекаляй (эл. печь), не перемораживай (холодильник)
6. Управление температурным режимом электропечи — экономия 20—50 %
7. Внедряйте скоростные режимы резания металлов (расход электроэнергии уменьшается на 15—20 %)
8. Шире используйте вторичные энергоресурсы
9. Ежегодный энергобаланс — основа энергосбережения
10. Не допускай утечки воды, сжатого воздуха и пара
11. Правильная заточка инструмента, очищение осветительной арматуры от пыли и грязи, своевременная побелка потолков и стен в светлые тона — снижает потери электроэнергии
12. Возвращайте конденсат (потери 1 тонны конденсата равносильна потере 15—20 кг топлива)
13. Компенсация реактивной мощности снижает потери электроэнергии в сетях
14. Не допускайте потерь смазочных материалов
15. Внедряйте обратное водоснабжение (экономия до 15 %)
16. Устанавливайте конденсатоотводчики
17. Сокращайте удельный расход топлива
18. Рациональное использование электроэнергии — дополнительная прибыль предприятию

Формат всех плакатов 45×60 см. Цена 20 к.

**Заказы на необходимое количество плакатов направляйте по
адресу:**

121096, Москва, ул. Василисы Кожиной, д. 10. Телефон 145-61-42.

УДК 621.315.17.001.6

Проблемы надежности и механики воздушных линий

(статья Л. М. Кесельмана, «Электричество», 1991, № 10)

ХОТИНСКИЙ В. Г.

Актуальность исследования надежности воздушных линий электропередачи (ВЛ) и учета ее при проектировании объясняется, с одной стороны, ролью ВЛ в снабжении потребителей электроэнергией, с другой — значительной их повреждаемостью (на долю ВЛ приходится свыше 35 % отказов оборудования энергетических систем).

Руководством Минэнерго СССР поставлена задача перед институтом Энергосетьпроект и ВНИИЭ — разработать и внедрить в практику проектирования методику расчета надежности ВЛ.

Повреждаемость ВЛ определяется многими факторами: природными воздействиями, дефектами изготовления строительных конструкций и других элементов ВЛ, некачественным выполнением строительно-монтажных работ, незащищенностью ВЛ от повреждений транспортными средствами и посторонними лицами и пр.

Аварии из-за воздействий ветра и гололеда или их сочетания, превышающих расчетные значения, составляют до 20 % общего количества аварий на ВЛ 35 кВ и выше. В то же время по этой причине происходит ежегодно 40 % всех аварий, связанных с падением опор на ВЛ этих напряжений.

Аварии, вызванные гололедно-ветровыми нагрузками, являясь наиболее тяжелыми по своим последствиям. Они приводят к разрушениям многих элементов ВЛ (не только опор, но и проводов, грозозащитных тросов, гирлянд изоляторов), охватывают в ряде случаев большие территории, приводя к повреждению многих линий одновременно, требуют для восстановления ВЛ значительного времени, капитальных вложений, материальных ресурсов и трудозатрат и связаны с наибольшими размерами недоотпуска энергии.

Разработка методики расчета надежности ВЛ, учитывающей все причины повреждения ВЛ, является комплексной задачей, требующей для своего решения значительного времени.

В связи с этим наиболее целесообразной является первоочередная разработка методики расчета надежности ВЛ при воздействии гололедно-ветровых нагрузок.

На совместном заседании НТС института Энергосетьпроект и ВНИИЭ были рассмотрены вопросы разработки методики расчета надежности ВЛ и признание целесообразным разрабатывать как методику, в основе которой лежит концепция, предложенная Техническим комитетом 11 МЭК, с привязкой ее к условиям Советского Союза и учетом принятых в СССР требо-

ваний к проектированию (разработка проводится в институте Энергосетьпроект), так и методику, в которой показатели надежности элементов ВЛ оцениваются по статистике вычислительного эксперимента при имитационном моделировании с помощью ЭВМ (разработка проводится во ВНИИЭ).

Методика, разработанная на основе концепции МЭК, позволит проектировать ВЛ с заранее назначенным уровнем надежности и избегать разработки многочисленных вариантов проектов для выбора из их числа оптимального. Однако для реализации методики МЭК необходимо одновременно с разработкой самой методики создать также критерии надежности ВЛ в зависимости от их назначения, что представляется довольно трудоемкой задачей.

Также значительные сложности представляет установление уровней расчетной прочности элементов ВЛ, и в первую очередь — опор и фундаментов, поскольку статистических данных об их работе в эксплуатации и об испытаниях на полигонах может оказаться недостаточно.

В статье Л. М. Кесельмана рассматриваются вопросы обеспечения необходимого уровня надежности ВЛ и их элементов при воздействии атмосферных нагрузок (ветер, гололед и ветер при гололеде). Однако на надежность ВЛ, как отмечено выше, влияют многие факторы. В связи с этим, возможно, следует не разрабатывать методику создания единой гарантированной надежности ВЛ в целом (за весь срок службы), а ограничиться управлением надежностью элементов ВЛ в зависимости от причин аварий (отказов в работе).

В целом поставленные в статье Л. М. Кесельмана задачи необходимо решать, причем в возможно более короткие сроки и с учетом того, что гарантированной надежностью должны обладать не только вновь сооружаемые, но и реконструируемые ВЛ. Для решения этих задач Минэнерго СССР должно обеспечить на ближайшие годы финансирование научно-исследовательских работ в требуемом объеме.

Что касается вопросов расчета механической части ВЛ, а именно учета остаточных деформаций проводов, выбора аварийных режимов и определения нагрузок в этих режимах и ряда других, связанных с переходом к расчету проводов методом предельных состояний, то в статье Л. М. Кесельмана справедливо определены направления, по которым должны проводиться первоочередные научно-исследовательские работы.

УДК 628.9.041.6:930

К истории создания электрической лампочки накаливания

Более чем 150-летняя история электрической лампочки накаливания началась с опытов по нагреванию проволоки из тугоплавких металлов. Одержав победу над газовым освещением в конце XIX столетия (лампочки Лодыгина и Эдисона), лампочка накаливания в настоящее время является одним из основных источников освещения и сигнализации в быту, промышленности и на транспорте [1]. Как и всякие изобретения, она была вызвана настоятельной потребностью общества в удобном и дешевом источнике света и стала возможной только после широкого распространения электрических генераторов, использовавших принцип электромагнитной индукции и дававших возможность получения достаточно дешевой электроэнергии. Эта история изложена вполне подробно во множестве отечественных и зарубежных публикаций.

Однако широко известный путь создания дешевой и долговечной массовой лампочки накаливания был не единственным. Не всегда экономичность, простота конструкции и обслуживания, а также большой срок службы являются решающими факторами. Известны лампы специального назначения например, применяемые в медицине, критерии оценки качества конструкции которых отличаются от общепринятых. Одну из таких конструкций и предложил профессор Харьковского университета И. П. Лазаревич, она же явилась одной из первых практически пригодных электрических ламп накаливания. Отметим то любопытное обстоятельство, что изобретатель этой лампы по образованию был не физик, не техник, а врач. Однако этому обстоятельству не стоит удивляться, вспомним, что у основ науки об электричестве стоял лейб-медик Гильберт, а создание первого источника электрического тока связано с именем акушера и физиолога Гальвани.

История лампочки накаливания И. П. Лазаревича незаслуженно забыта и только вскользь упоминается в работах по истории техники [3, 5]. Необходимо восполнить этот пробел не только с точки зрения приоритета и объективности, но и с точки зрения изучения эволюции конструкций источников электрического света и даже электронной лампы.

Развитие медицины в середине XIX столетия объективно привело к потребности применения источников света в диагностике некоторых видов заболеваний. Первая конструкция такого источника света была создана Румкорфом в 1860 г. с помощью газоразрядных (гейслеровых) трубок. Однако этот светильник обладал двумя существенными недостатками: 1) цвет, излучаемый трубкой, зависел от применяемого газа и 2) был недостаточно ярким. И, если с первым недостатком можно было бороться — применять нужный газ или смесь газов, то второй был непреодолим и не годился для просвечивания человеческого тела. Использование этих светильников ограничилось опытами применения их для освещения полости рта. Конструкция распространения не получила.

В том же 1860 г. в одном из своих трудов профессор Венского университета Иоганн Чермак отметил: «гортань и дыхательное горло вместе с покрывающими их тканями хорошо просвечивают... Просвечивание могло бы быть употреблено с пользою для исследования». Он предлагал просвечивание с помощью «концентрированных» солнечных лучей посредством линз или вогнутых зеркал и даже использование газового освещения. Эту идею использовал некий зубной врач Брук в 1865 г., но уже для исследования зубов в челюсти, он же и предположил, что способ просвечивания с успехом может применяться в хирургии. Самым же главным нововведением Брука было употребление раскаленной электрическим током платиновой проволоки в качестве источника света. Проволока свертывалась в спираль и помещалась в стеклянный цилиндр, который вставлялся в рот. Исследования проводились в темноте.

20 августа 1867 г. с докладом на Международном медицинском конгрессе в Париже выступил киевский врач Миллиот. Во время доклада он демонстрировал

ДИАФАНОСКОПИЯ

ИЛИ

ПРОСВЕЩИВАНИЕ

въ примѣненіи къ изслѣдованію тканей и
органовъ въ женскомъ тѣлѣ,

съ описаніемъ способа зачаточнаго образованія матки
и отсутствія рожавы. — (Uterus rudimentarius — defectus vaginae).

Съ 19-ю рисунками.

Профессора И. Лазаревича.

Зрѣніе составляетъ первый источникъ
нашихъ знаний въ мірѣ вещей, и потому,
безпрестанно способствуя къ ихъ рас-
ширенію и къ ихъ правильному бытію,
является «пустотой» естественнаго познателя.
Шлегель.

ХАРЬКОВЪ.
въ университетской типографіи.
1868

Рис. 1. Работа И. П. Лазаревича с описанием его электрической лампочки — диафаноскопа

просвечивание внутренностей собаки (находилась под наркозом) прибором, подобным прибору Брука, и высказал убеждение, что просвечивание живота человека может быть применено для диагностики «с безопасностью и большой пользой». 1 февраля 1868 г. в Обществе русских врачей в Петербурге Миллиот заявил буквально следующее: «Продолжая после конгресса (в Париже — Б. Х.) свои диоптрические исследования на животных и человеческом трупе, я пришел к тому заключению, что человеческий организм весь просвечивает и что просвечиваемость его находится в прямом отношении к употребляемому для его освещения свету». Таким образом, трудность заключалась в получении достаточно мощного источника света.

Профессор И. П. Лазаревич также присутствовал в Париже на конгрессе. Вот, что он пишет о своих впечатлениях: «Я присутствовал при опытах Миллиота в Париже и был свидетелем того, как были поражены многие из присутствующих, когда сквозь брюшные покровы животного обнаружился яркий красный свет; но тогда мне показалось, что едва ли возможно применить просвечивание живота к человеческому организму: по крайней мере такой новый способ исследования мне показался мучительным и небезопасным» [2, с. 8].

Что же смущало И. П. Лазаревича? Беспокоило его большое количество тепла, выделяющегося в платиновой нити при накаливании. Это могло привести к болезненным ощущениям у больных и даже к ожогам. Однако встретившийся в его медицинской практике клинический случай, привел его к попытке создания электрического светильника особой конструкции.

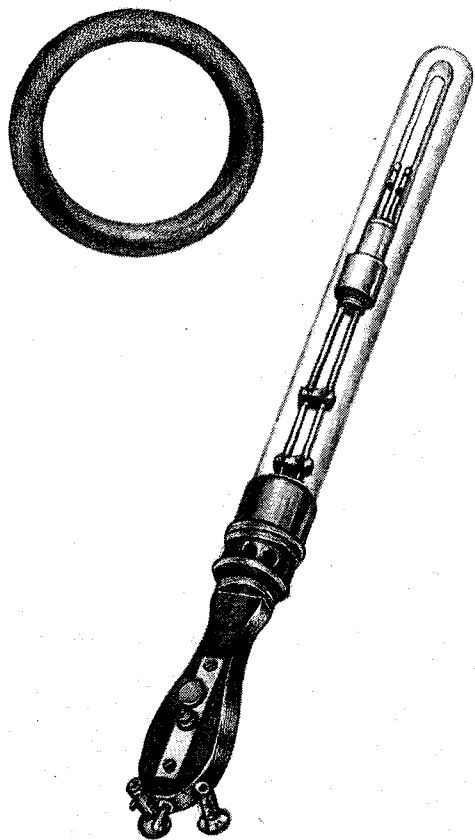


Рис. 2. Просвечиватель (диафаноскоп) И. П. Лазаревича в первом его варианте. Вверху изображено кольцо, которое накладывалось для нажатия брюшины в рассматриваемом месте

На изолированной деревянной ручке, служившей одновременно изолятором, укреплялись два параллельных медных штыря со специальными винтовыми зажимами. Эти зажимы крепили платиновую нить накала. Так что смена сгоревшей нити затруднений не вызывала. В рукоятке находился коммуникатор (выключатель), дающий возможность прерывать в любой момент ток. Нить накала была покрыта стеклянным цилиндром, служащим для ее ограждения. Медные штыри со стеклянным цилиндром на конце помещались в другой, более крупный стеклянный цилиндр, также укрепленный на этой же ручке. Последний имел длину 210 мм, диаметр 20 мм, а толщина его стенок была около 3 мм. Один конец цилиндра был запаян и имел овальную форму для удобства введения в организм человека, а другой конец между ручкой и цилиндром был укреплен с помощью костяного кольца, имеющего в своем корпусе отверстия для выхода нагретого воздуха. Светильник был изготовлен в Харькове в мастерской Эдельберга и обошелся изобретателю в 55 рублей серебром. Питание светильника осуществлялось от батареи элементов Бунзена (6—8 элементов). Степень накала регулировалась количеством элементов, включенных в цепь [2, с. 17—18].

В том же 1868 г. автор впервые просветил внутренности большой крестьянки Ульяны Шкуреноквой. Новый метод диагностики И. П. Лазаревич вводит в свою медицинскую практику: «В течение короткого времени, которое прошло после того, как я в первый раз употребил просвечивание живота, я многократно (до 60 раз) испытывал этот способ исследования на больных, с различным успехом или неудачей. Я старался усовершенствовать способ просвечивания, определить правила его употребления». Однако не всеми медиками новый способ исследования был положительно встречен. «Нужно было бороться с немалыми затруднениями при употреблении еще нового, пугавшего воображение, способа исследования», — писал Лазаревич в своей автобиографии [3, с. 105].

Основной недостаток конструкции автор видит в высокой температуре нити накала лампы: «Платиновая проволока, накаливаемая до начала появления красного цвета, обнаруживает температуру около 500 °С, а при накаливании ее добела температура ее достигает 1000 °С; следовательно освещение платиновой проволокой, накаленной добела, сопряжено с образованием огромного количества теплоты. К сожалению, я не знаю ни одного металла или металлического сплава, который мог бы в требуемом случае удобно заменить платину. Гейслеровы трубки при освещении не разогреваются, но зато они так мало дают световых лучей, для просвечивания они вовсе не годятся».

Таким образом И. П. Лазаревич столкнулся с теми же обстоятельствами, что и все изобретатели ламп накаливания. Наружный стеклянный цилиндр его лампы нагревался до 38 °С за одну минуту. Продувая трубку холодным воздухом, Лазаревич увеличил это время на двадцать секунд, чего явно было недостаточно и значительно усложняло конструкцию лампы.

Изучая труды физиков по радиации тел П. Прево, М. Меллони и Дж. Тиндала, изобретатель сделал правильный вывод, что на световые лучи при накаливании платиновой проволоки приходится всего 2 % энергии, а на тепловые, невидимые и, следовательно, вредные для его опытов лучи — основная часть расходуемой энергии. Он делает такой вывод: «...невыгода, происходящая от обильного образования темных лучей при накаливании платиновой проволоки, может быть уменьшена избранием такой окружающей ее среды, которая была бы способна как можно более поглощать темные лучи, следовательно обладала бы незначительной теплопроводностью, а пропускала бы как

можно свободнее только светлые лучи». Таким веществом мог бы стать газообразный аммиак, помещенный в полости между стеклянными колбами, теплопроводность которого автор считает в 7260 раз ниже теплопроводности воздуха, однако аммиак опасен для больного и врача в любом аварийном случае.

И. П. Лазаревич решает воспользоваться для этой цели плотной средой — кристаллами квасцов, которые поглощают 95 % тепловых лучей. Он пишет: «При устройстве просвечивающего аппарата, надо иметь в виду образование как можно большей степени освещения; следовательно при избрании материала не теплопрозрачного, т. е. непроницаемого для теплоты, нужно, чтобы в то же время он был как можно более прозрачен для световых лучей. По-видимому, больше всего такому требованию удовлетворяют квасцы, которые пропускают почти все световые лучи, поглощая все темные; но различные способы, которые я испытал для наполнения квасцами промежутка между двумя стеклянными цилиндрами просвечивающего снаряда, оказались вполне неудовлетворительными. Квасцы прозрачнее всего бывают в виде кристалла, но и самый чистый кристалл квасцов скоро покрывается кристаллами-паразитами, делающими поверхность его матовою; и наконец от возвышения температуры, квасцы обжигаются и делаются белыми, непрозрачными».

Из работ Дж. Тиндала И. П. Лазаревич выяснил, что стекло толщиной 0,1 дюйма (2,5 мм) задерживает около 25 % тепловых лучей, поэтому он приходит к выводу: «Я нахожу полезным употреблять более толстые стеклянные цилиндры». В дальнейших конструкциях верхнюю колбу изобретатель укоротил вдвое и сделал весьма интересное замечание: «Я нашел, что раскаленная платиновая проволока наиболее дает света, когда имеет вид не спирали, а удлиненной петли, хотя в обоих случаях длина ее была одинакова». Заметим, что внутренняя колба светильника Лазаревича удивительно напоминает конструкцию современной коммутаторной лампочки.

В таком виде конструкцию приходилось при работе часто выключать и охлаждать в сосуде с водой. Однако автору конструкции все-таки пришлось пойти на ее усложнение — ради удобства в работе. И деятельное участие в этом принял выдающийся русский физик и электротехник Д. А. Лачинов. В дополнениях В. Черкасова к переводу с французского книги А. Гано «Полный курс физики» можно прочесть, что усовершенствование заключалось в пропускании непрерывной струи воды между двумя колбами светильника, «которая устраняя нагревание, дает возможность длить наблюдение непрерывное время. Усовершенствование это было сделано г. Лазаревичем (сначала отрицавшим его) по указанию г. Лачинова» [4, с. 938—939]. Такая конструкция светильника просуществовала около двух десятиков лет [5, с. 139].

Д. А. Лачинов тоже пытался усовершенствовать прибор И. П. Лазаревича и предложил в таком же светильнике использовать другой разряд, так как светильник Лазаревича давал недостаточно яркий свет. Прибор Д. А. Лачинова приобрел известность и начал применяться в медицинской практике, но был более опасен для больного (напряжение питания более 30 В) и требовал регулирования зазора между электродами, что усложняло работу с ним, поэтому его конструкция распространения не получила [3, с. 111]. Однако такой метод охлаждения электрических ламп не был забыт. Несколько десятилетий спустя русский радиотехник М. А. Бонч-Бруевич применит его для охлаждения колб мощных генераторных электронных ламп,

[6, с. 173]. Заметим также, что современные конструкции аналогичных устройств используют световые волокна и электрические лампы накаливания, охлаждаемые струями воздуха, как в первой конструкции И. П. Лазаревича, правда с помощью вентилятора.

Свой аппарат автор называет диафаноскопом, а метод диафаноскопией. «Просветителем, — пишет он, — может быть исследовано только одно из качеств какой-либо части организма, а именно ее просвечиваемости или прозрачности, или способности пропускать сквозь себя световые лучи; а потому я нахожу вполне соответственным этот способ исследования назвать диафаноскопией [diaphaines (греч.) — прозрачный, скоро (греч.) — рассматриваю, наблюдаю]. Это название может быть прилично, какая бы часть организма не была подвергнута исследованию просвечиванием, будет ли это часть тела, как например, рука, или орган, или какая-нибудь ткань, как например, соединительная ткань в окружности матки». Диафаноскопия пережила появление в 1895 г. рентгенодиагностики и в настоящее время используется при исследованиях глаз, околоушных слюнных желез и др. [7, с. 276—277].

Несколько слов о личности изобретателя.

Иван Павлович Лазаревич (1829—1902 гг.) окончил в 1853 г. Киевский университет, в 1857 г. защитил докторскую диссертацию. С 1862 г. был профессором медицинского факультета Харьковского университета. Он является автором фундаментального труда «Курс акушерства». Диафаноскоп — не единственное изобретение И. П. Лазаревича. Им разработан и внедрен ряд медицинских инструментов для родовспоможения и др. За свои инструменты, среди которых был и диафаноскоп, и атлас гинекологических и акушерских инструментов И. П. Лазаревич был награжден Золотой медалью на выставке в Лондоне (1873 г.). Он был почетным членом ряда научных обществ в России, Великобритании и США [8, с. 290].

К сожалению, труды И. П. Лазаревича по созданию электрической лампочки накаливания и разработке нового метода диагностики, которому он дал название, остались почти незамеченными. Даже в Большой медицинской энциклопедии в статье о И. П. Лазаревиче по рассматриваемому нами вопросу лишь отмечено: «известны его работы по диафаноскопии». Это, конечно слишком скромное упоминание о деятельности пионера применения электрической лампочки накаливания не только в медицине, но и светотехнике вообще.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шателен М. А. Из истории изобретения лампы накаливания. — Архив истории науки и техники, 1934, вып. 4. с. 299—312.
2. Лазаревич И. П. Диафаноскопия или просвечивание в применении к исследованию тканей и органов в женском тазе. — Харьков, 1868.
3. Ржонский Б. Н. Дмитрий Александрович Лачинов. Жизнь и труды. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1955.
4. Гано А. Полный курс физики. 3-е изд., испр. и доп. / Пер. с фр. Ф. Павленкова и В. Черкасова. — СПб, 1874/. Дополнения к главе X В. Черкасова.
5. Хвольсон О. Популярная лекция об электричестве и магнетизме. — СПб, 1884.
6. Бонч-Бруевич М. А. Собрание трудов. — М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1956.
7. Филиппов М. М., Шевелев И. Н., Тамарова Р. М. Диафаноскопия. — Большая медицинская энциклопедия. Т. 7, 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1977.
8. Кирюшенков А. П. Лазаревич Иван Павлович (1829—1902). — Большая медицинская энциклопедия. Т. 12, 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1980.

ХАСАПОВ Б. Г.

В Центральном правлении ВНТОЭ

На пленуме СНИО СССР, состоявшемся в мае с. г. в Москве, среди других вопросов был заслушан доклад председателя Президиума ЦП ВНТОЭ, чл.-корр. АН СССР Н. Н. Тиходеева. Публикуем сокращенный вариант доклада

«О проекте нового устава ВНТОЭ и изменении его структуры»

Сейчас ВНТОЭ объединяет 350 тыс. членов, работающих в 3458 первичных организаций, созданных прежде всего на предприятиях и в организациях Минэнерго СССР (65—70 %), б. Минэлектротехпрома (15—17 %), а также на предприятиях и в организациях других министерств и ведомств. Руководство деятельностью первичных организаций на местах осуществляют 112 республиканских, краевых и областных правлений, действующих во всех регионах страны.

За последние годы после IX съезда в жизни Общества произошли многие существенные изменения.

1. За счет широко развернутой работы временных творческих коллективов (ВТК) практически во всех региональных правлениях активизировалась работа Общества на местах, выросла отдача многих специалистов, объединяемых ВНТОЭ, резко изменилось к лучшему финансовое состояние правлений. Сегодня отчисления от этой деятельности — основа нашего бюджета; членские взносы отошли на второй план, но не потеряли своего значения. Финансовая самостоятельность региональных правлений усилила стремление и к юридической самостоятельности наших региональных правлений.

2. С 1991 г. ЦП перешло к договорным отношениям с региональными правлениями, что покрывает все расходы ЦП ВНТОЭ в текущем году.

3. В соответствии с действующим Уставом в ВНТОЭ активно формируется трехуровневое членство. В настоящее время принято на основе трех рекомендаций: 109 действительных членов по Ассоциации инженеров-электриков, 51 действительный член по Ассоциации инженеров-теплоэнергетиков и 42 по Ассоциации инженеров-гидроэнергетиков. К великому сожалению, региональные правления, за редким исключением, пока еще не провели отбор и выбор своих экспертов — наиболее активных и квалифицированных специалистов на местах.

Что же касается членов ВНТОЭ, то их количество монотонно уменьшается и будет снижаться и далее, если ЦП и наши региональные правления не найдут новые интересные формы работы в первичных организациях.

4. После долгих лет существования административно-управленческой системы в унитарном государстве, где и в НТО действовал принцип «демократического централизма», сейчас проявляется большая тяга к самостоятельности во всем.

Сначала образовалось самостоятельное Общество энергетиков в Литве. В декабре прошлого года образовалось самостоятельное Украинское общество энергетиков, в декабре — СНИО России, в марте образовалось самостоятельное Московское общество, в апреле учреждено Российское НТОЭ. Ясно, что процесс создания самостоятельных НТО энергетиков и электротех-

ников пойдет и дальше. В феврале в Президиум ЦП обратился инициативный комитет Общества светотехников с просьбой об его организации под эгидой ВНТОЭ. На сентябрь это общество наметило проведение своего учредительного съезда. Такие же инициативы могут последовать и от других региональных правлений и от других групп специалистов, чьи профессиональные интересы выходят за рамки двух основных отраслей, охватываемых ВНТОЭ (например, от специалистов по использованию торфа). Появились в нашем составе и производственно-технические Ассоциации, например, Ассоциация по системам автономного энергоснабжения. Все это указывает на необходимость радикального пересмотра структуры ВНТОЭ.

5. Наше бурное в политическом и экономическом отношении время высветило одну непреложную истину: нельзя до основания разрушать старое, а затем строить новое с нуля. Нужно в недрах старого находить «точки роста» и выращивать ростки нового, набравшись терпения. Такими «ростками» в ВНТОЭ в последние годы стали: ВТК; Ассоциации действительных членов, собирающие наш «золотой фонд» специалистов; экономические взаимоотношения между правлениями; образование внутри ВНТОЭ самостоятельных обществ и т. п.

6. Все указанное выше можно учесть и позитивно использовать при новом федеративном устройстве нашего Общества. Но прежде чем перейти к самому устройству, нужно ответить на главный вопрос: а требуется ли нам какое-либо объединение самостоятельных Обществ?

Президиум, Уставная комиссия и пленум ЦП ВНТОЭ, состоявшийся в апреле, ответили на поставленный вопрос положительно. Многие из региональных обществ (например, Российское, Московское, Ленинградское) также ответили на этот вопрос положительно. Остальные, как мы надеемся, выскажут свое мнение в ближайшее время на своих собраниях и пленумах.

Какие основные соображения для сохранения единства Общества? Это:

сохранение Министерства энергетики и электрификации страны, крупные организации которого есть в каждой республике, крае и области, и ЕЭС страны; топливно-энергетический комплекс страны таков, что редко какая республика и тем более край или область могут обеспечить себя электричеством и топливом самостоятельно; исключения составляют только РСФСР, Казахстан и Туркмения, имеющие избыток энергетических ресурсов;

специалисты, составляющие основу нашего Общества, распределены по стране также крайне неравномерно; в РСФСР у нас 182 тыс. человек, на Украине — 82 тыс., в Казахстане — 21,3 тыс., в Москве — 25,1 тыс., в то время как в Туркмении их 2 тыс., Таджикистане — 3 тыс., Эстонии — 1,6 тыс. и т. д.;

центрами электротехнической промышленности являются Москва, Ленинград, Харьков, Новосибирск, Свердловск, Тирасполь, Лысьва, Ереван и другие города; центры разработки и изготовления энергетического оборудования размещены также неравномерно: Ленинград, Харьков, Таганрог, Сызрань, Барнаул, Москва...

— во всем мире ученые стремятся создать международные союзы или общества по интересам, для того чтобы охватить и использовать достижения всех стран:

— журналы, а их у нас 8, также нельзя растащить по регионам. Они требуют нашей помощи, в том числе творческой и финансовой. Ситуация в 1991 г. однозначна: тиражи малы и все время уменьшаются, на журналы специалисты не подписываются; общий дефицит в 1991 г. по всем журналам превысит 750—900 тыс. руб.

В этих условиях разделение Общества на региональные было бы регрессом. В обществе нужно сохранить объединяющее профессиональное начало, ослабив административное. Этот принцип можно удовлетворить при федеративном устройстве нашего Общества.

8. Что же предлагается сделать?

Предлагается федеративное устройство нашего Общества, точнее, Федерация самостоятельных обществ и ассоциаций (далее — субъектов Федерации) энергетического и электротехнического профиля. Членами Федерации могут быть республиканские и другие региональные научно-технические общества энергетиков и электротехников, ассоциации действительных членов, различные научные, научно-технические и технические общества и ассоциации, признающие Устав ФНТОЭ. Поэтому-то устав любого субъекта Федерации должен быть в первую очередь зарегистрирован в ФНТОЭ (или пока в ЦП ВНТОЭ), а затем — в местных органах власти.

Нам вовсе не следует ставить знак равенства между субъектами СССР и субъектами ФНТОЭ. В нашем случае важнейший критерий — число членов НТО, в ассоциациях — действительных членов. Вот почему ЦП поддержало предложение Московского и Ленинградского правлений в их стремлении стать субъектами Федерации. Не исключено, что этому примеру последуют организации Новосибирска, Свердловска, Иркутска, Харькова, концентрирующие наибольшее число специалистов.

Отношения между субъектами Федерации и органами ФНТОЭ будут строиться на договорной основе при полной самостоятельности и полном самофинансировании каждого субъекта Федерации.

Структура ФНТОЭ должна учитывать следующие изменения в функциях ФНТОЭ и субъектов Федерации:

субъекты Федерации опираются в своей работе на своих экспертов, на свои собственные структуры и первичные организации; ФНТОЭ опирается в своей работе на субъекты Федерации, ассоциации действительных членов, секции нынешнего ЦП ВНТОЭ.

Таким образом, трехуровневое членство помогает нам построить Федерацию и исключить параллелизм в работе органов ФНТОЭ и ее субъектов.

Изменения должны будут коснуться и научно-технической работы ФНТОЭ и субъектов Федерации. Главными заботами Федерации будут общесоюзные научно-технические программы и проблемы энергетики и электротехники, работа по постепенному переходу в Общество вопросов стандартизации, сертификации оборудования, общественная экспертиза проектов крупных энергетических объектов, проведение всесоюзных и международных конференций и симпозиумов, издание журналов.

Основой деятельности республиканских и других

региональных обществ должна стать экспертиза проектов энергообъектов региона, постоянная забота о разработке и реализации региональных энергетических программ, поиск наиболее эффективных путей разрешения проблем энергетики и электротехники в своих регионах, создание и высококвалифицированная поддержка постоянно действующих комиссий по энергетике из числа энергетиков, крупных потребителей энергии и представителей местной власти.

В предлагаемой Президиумом ЦП принципиальной (структурной) схеме ФНТОЭ необходимо иметь три основных звена:

Административный совет (АС) из представителей (руководителей) каждого субъекта Федерации (по одному от каждого);

Научно-технический комитет (НТК), состоящий из президентов Ассоциаций действительных членов и председателей их секций (ныне бюро секций ЦП), входящих в Ассоциацию, а также руководителей отдельных Обществ — специалистов по интересам (например, Общества светотехников);

Исполком со штатными работниками — для оперативного руководства делами Федерации.

9. Состав Административного Совета утверждается съездом (конференцией) ФНТОЭ, в период между съездами (конференциями) — Советом ФНТОЭ.

Административный Совет обсуждает и выносит на рассмотрение съездов, конференций и Совета ФНТОЭ основные вопросы деятельности Федерации: изменение Устава ФНТОЭ; прием в ФНТОЭ новых субъектов, формирование и выполнение тематических планов, в том числе международного научно-технического сотрудничества, и бюджета ФНТОЭ; направление средств ФНТОЭ на развитие материально-технической базы ФНТОЭ; издание научно-технических журналов, книг и др. печатных материалов. Заседания Административного Совета проводятся по мере необходимости, но не реже одного раза в год.

10. Состав Научно-технического комитета утверждается съездом (конференцией) ФНТОЭ, а в период между съездами (конференциями) — Советом ФНТОЭ.

Научно-технический комитет: создает новые ассоциации, секции и другие творческие объединения, проводит всесоюзные научно-технические совещания, семинары, дискуссии по актуальным вопросам; участвует в формировании и реализации тематических планов работы ФНТОЭ; участвует в обсуждении в государственных и хозяйственных органах вопросов перспектив развития и научно-технического прогресса; делегирует в редколлегии издаваемых (соиздаваемых) журналов членов ассоциаций; занимается стандартизацией и сертификацией изделий; ведет исследования и разработки по заказам; проводит конкурсы и смотры, учреждает и присуждает различные премии ФНТОЭ; присуждает именные премии Федерации: в области электроэнергетики — имени чл.-корр. АН СССР М. А. Шателена, в области электротехники — имени акад. М. П. Костенко, в области гидроэнергетики — имени акад. Б. Е. Веденеева, в области теплоэнергетики — имени акад. С. С. Кутателадзе, другие именные премии; проводит общественное обсуждение работ и выдвигает членов Федерации на соискание Ленинской и Государственной премий СССР в области науки и техники; выдвигает кандидатов для избрания действительных членов и членов-корреспондентов АН СССР; представляет работы на соискание золотых медалей и именных премий Академии наук СССР; поддерживает представления к присвоению почетных званий, высказывает мнение о работах соискателей на ученые степени и звания; принимает новых действительных членов в ассоциации.

11. Руководители Исполкома избираются съездом

(конференцией), а в период между ними — Советом ФНТОЭ по представлению Президента ФНТОЭ. Избираются: Генеральный секретарь, его заместитель и казначей (главный бухгалтер).

Исполком возглавляется Генеральным секретарем. По его представлению утверждаются Советом ФНТОЭ структура, штаты, бюджет и обязанности сотрудников аппарата Исполкома.

Исполком осуществляет текущую работу между съездами ФНТОЭ и Пленумами Совета ФНТОЭ и выполняет поручения АС и НТК:

организует практическое выполнение постановлений съездов и Совета ФНТОЭ;

организует выполнение решений АС и НТК;

организует формирование и практическое выполнение тематических научно-технических и финансовых планов ФНТОЭ;

осуществляет хозяйственную и внешнеэкономическую деятельность ФНТОЭ.

12. Высшим органом ФНТОЭ в период между съездами является Совет Федерации.

Совет ФНТОЭ формируется в составе Президента ФНТОЭ (пост президента или почетного президента), вице-президентов, председателя ревизионной комиссии, Административного совета, Научно-технического комитета, руководителей Исполкома, видных ученых и специалистов.

Пленум Совета ФНТОЭ созывается по мере необходимости, но не реже одного раза в год.

Совет Федерации:

руководит деятельностью ФНТОЭ в период между съездами ФНТОЭ;

в период между съездами принимает в состав ФНТОЭ новых субъектов Федерации;

имеет право вносить изменения и дополнения в действующий Устав ФНТОЭ с последующим их утверждением на очередном съезде (конференции) ФНТОЭ;

ежегодно утверждает планы работы ФНТОЭ, в том числе его бюджет и отчеты Исполкома об их исполнении.

Заседания Совета ФНТОЭ проводятся не реже одного раза в год.

13. Высшим органом ФНТОЭ является съезд. Съезд ФНТОЭ:

созывается Административным советом ФНТОЭ один раз в пять лет (возможен созыв внеочередного съезда, в том числе по требованию половины субъектов ФНТОЭ);

избирает президента, почетного президента, вице-президентов, председателей Административного совета и Научно-технического комитета, их заместителей, генерального секретаря и его заместителя, казначея (главного бухгалтера), а также ревизионную комиссию;

заслушивает и утверждает отчеты президента, председателей Административного совета, Научно-технического комитета, Исполкома, ревизионной комиссии, президентов ассоциаций действительных членов и казначея (главного бухгалтера);

определяет основные направления деятельности и формирует предложения по улучшению деятельности ФНТОЭ;

утверждает новый Устав и структуру ФНТОЭ;

формирует Административный Совет, Научно-технический комитет и Исполком;

формирует Совет Федерации;

утверждает прием в ФНТОЭ новых членов;

избирает Президиум Совета Федерации для решения текущих вопросов Федерации, за исключением тех, которые могут решаться только АС и НТК.

14. ФНТОЭ создает в своем составе творческие организации:

Ассоциацию инженеров-электриков, объединяющую действительных членов ФНТОЭ в области электроэнергетики и электротехники,

Ассоциацию инженеров-теплоэнергетиков, объединяющую действительных членов ФНТОЭ разных областей теплоэнергетики,

Ассоциацию инженеров-гидроэнергетиков, объединяющую действительных членов ФНТОЭ по разным областям гидроэнергетики,

другие аналогичные общественные объединения по творческим интересам.

Каждая Ассоциация в составе ФНТОЭ ведет свою работу автономно в соответствии с Уставом ФНТОЭ и Уставом Ассоциации, координируя свою деятельность с Научно-техническим комитетом ФНТОЭ, с Отделением физико-технических проблем энергетики АН СССР и Отделением энергетики Инженерной академии. Устав каждой Ассоциации утверждается ее Учредительным собранием, созываемым Научно-техническим комитетом ФНТОЭ, и регистрируется Советом ФНТОЭ.

Для руководства текущей деятельностью Ассоциации избирается ее Президиум в составе Президента, его вице-президентов, членов Президиума и казначея. Казначей ведет учет действительных членов и уплаты ими взносов и работы на общественных началах. В ассоциациях организуются необходимые секции по интересам.

План работы Ассоциации ФНТОЭ разрабатывается ее Президиумом на 2 года, рассматривается и утверждается на ежегодных общих собраниях (конференциях) членов Ассоциации.

Ассоциации создают творческие коллективы, рабочие комитеты, группы и т. п.; утверждают и заслушивают их руководителей. Ассоциации совместно с ОФТПЭ АН СССР готовят и проводят научные конференции (семинары, симпозиумы, коллоквиумы). Ассоциации ФНТОЭ ежегодно проводят общие собрания всех своих членов (или заседания секций) для заслушивания и обсуждения научно-технических докладов по предпочтительным темам, отбора лучших докладов для их опубликования в журналах ФНТОЭ и ОФТПЭ АН СССР.

Денежные средства ассоциаций образуются от членских взносов их действительных членов, отчислений за выполнение хозяйственных работ, дотаций от ФНТОЭ, других поступлений.

Ассоциация имеет право создавать через Научно-технический комитет денежные фонды, образуемые государственными организациями, субъектами Федерации, региональными правлениями и коллективными членами для проведения научно-исследовательских и опытных работ по наиболее актуальным темам энергетики и электротехники.

15. ФНТОЭ будет работать по согласованным планам со всеми субъектами Федерации, а также в контакте с Академией наук СССР, Инженерной академией СССР, другими союзными и республиканскими академиями и их организациями; с Союзом научных и инженерных обществ СССР и РСФСР, Научно-промышленным Союзом СССР и другими организациями.

16. Учредительная конференция ФНТОЭ будет проведена в конце октября текущего года. В учредительной конференции с правом решающего голоса примут участие 88 членов ЦП, избранных IX съездом ФНТОЭ, а также делегаты, дополнительно избранные от вновь создаваемых ассоциаций и их секций, обществ и других субъектов Федерации.

Учредительная конференция ФНТОЭ рассмотрит и утвердит Устав Федерации, изберет ее руководящие и координирующие органы.

Председатель ЦП ФНТОЭ, чл.-корр. АН СССР
Тиходеев Н. Н.

Дмитрий Александрович Арзамасцев

(К 75-летию со дня рождения)

В октябре 1991 г. исполнилось 75 лет со дня рождения Арзамасцева Дмитрия Александровича, Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, доктора технических наук, профессора кафедры автоматизированных электрических систем Уральского политехнического института.

Д. А. Арзамасцев является ведущим советским ученым в области моделирования электроэнергетических систем (ЭЭС) и использования экономико-математических методов в задачах управления развитием и функционированием ЭЭС. Вся научно-педагогическая и производственная деятельность Д. А. Арзамасцева связана с электроэнергетикой Советского Союза.

После окончания Уральского политехнического института в 1940 г. он работал инженером, старшим инженером Уралэнерго, старшим диспетчером и начальником службы ОДУ Урала. В 1948 г. Д. А. Арзамасцев был приглашен на преподавательскую работу сначала в Энергетический техникум, а в 1950 г. — в Уральский политехнический институт. В 1952 г. он защитил кандидатскую, а в 1969 г. — докторскую диссертации. В 1970 г. ему было присвоено ученое звание профессора, а в 1980 г. — почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР». На протяжении 35 лет Д. А. Арзамасцев был заведующим кафедрой автоматизированных электрических систем УПИ им. С. М. Кирова.

Профессор Д. А. Арзамасцев является основателем и бессменным руководителем Уральской



научной школы электроэнергетиков. Сочетая в себе блестящий талант ученого, педагога и организатора, он внес значительный вклад в развитие энергетики Урала. Под его руководством кафедра выпустила более 3500 инженеров-электриков, успешно работающих на предприятиях Минэнерго СССР, многие из его учеников ныне возглавляют крупные предприятия и ОДУ энергосистемы СССР. Им подготовлено 60 кандидатов и два доктора технических наук. Д. А. Арзамасцев — автор свыше 270 научных работ, в том числе 25 монографий, учебников и учебных пособий по электроэнергетическим специальностям для вузов. Под руководством

Д. А. Арзамасцева выполнен ряд крупных научных исследований по проблемам экологии, экономичности, ресурсосбережения, повышения надежности и эффективности функционирования энергосистем СССР, результаты которых внедрены в ЦДУ ЕЭС СССР, ОДУ Урала, Казахстана, Северного Кавказа, во многих энергосистемах, используются в институте Энергосетьпроект и его Уральском и Среднеазиатском отделениях.

Признанием авторитета Д. А. Арзамасцева как видного ученого и педагога является избрание его в состав Президиума Научного Совета АН СССР по комплексным проблемам энергетики, заместителем председателя Уральского отделения этого Совета, заместителем председателя координационного Совета по проблемам энергетики Гособразовании СССР. Профессор Д. А. Арзамасцев входит в состав редколлегии нескольких научно-технических журналов, является членом ряда специализированных советов по защитах докторских и кандидатских диссертаций. Многолетний плодотворный труд талантливого педагога, ученого и человека профессора Д. А. Арзамасцева отмечен правительственными наградами.

Профессор Д. А. Арзамасцев встречает свой юбилей в окружении своих учеников, в расцвете сил, полный оптимизма, энергии и творческих планов на будущее. Поздравляя Дмитрия Александровича, желаем ему крепкого здоровья и новых творческих успехов в его плодотворной и многогранной научно-педагогической деятельности.

Группа товарищей

Вниманию руководителей организаций и предприятий!

**Книжный магазин № 170 Москниги принимает
заказы
и высылает наложенным платежом красочные
плакаты:**

По технике безопасности

1. Дай сигнал перед подачей напряжения на испытательную установку
2. Заземляй УВН при работе на деревянной опоре
3. Перед работой на воздушном выключателе: отключи цепи оперативного тока, заблокируй кнопку местного управления и пусковые клапаны, прекрати работы в шкафах управления и распределительных шкафах
4. Не проверил отсутствие напряжения
5. Отдели видимыми разрывами отключенную в ремонт часть
6. Включай после закрытия всех нарядов
7. Предохраняй от загрязнения (работа на ВЛ под напряжением)
8. Удали людей (при наладке воздушного выключателя)
9. Правильно поднимай штангу
10. Применяй при установке наладок (защитные средства)
11. Перед подачей испытательного напряжения дай сигнал
12. Применяй латунный инструмент
13. Загрузка влажного свинца опасна
14. Затяжку проводов делай только с лесов, подмостей
15. Знаковая сигнализация
16. Правильно выбирай защитные кожухи
17. Соблюдай сроки осмотров грузозахватных приспособлений
18. Выше нельзя (приставная лестница)
19. Установи деталь в устойчивое положение, затем обрабатывай
20. Допущен к этой работе (удостоверение сварщика)
21. Работай при включенной вентиляции
22. При работе в нескольких ярусах устанавливай защитные навесы
23. После обратного удара отдай водяной затвор на проверку
24. Не кури у газогенератора
25. Защищай баллон от нагрева
26. Отключи или выверни
27. Умей оказывать помощь пораженному электрическим током
28. С огнем не входи

Формат всех плакатов 45×60 см. Цена 20 к.

Заказы на необходимое количество плакатов направляйте по адресу:

121096, Москва, ул. Василисы Кожиной, д. 10. Телефон 145-61-42.

В Центральном правлении ВНТОЭ им. акад. Г. М. Кржижановского

Список действительных членов ассоциации инженеров-электриков, принятых в период
с 1 апреля до 1 июля 1991 г.

БЕЛКИН Г. С., доктор техн. наук, ВЭИ, Москва
БРЯНЦЕВ А. М., канд. техн. наук, Алма-Атинский энергетический институт, Алма-Ата
ЛЕЩИНСКАЯ Т. Б., профессор, МИИСП, Москва
МОЛОСНОВ Н. Ф., канд. техн. наук, ВИЭСХ, Москва
ИЛЬИНСКИЙ Н. Ф., доктор техн. наук, МЭИ, Москва
ЛООС А. В., профессор, Томский политехнический институт, Томск
МУРАДЯН А. Е., канд. техн. наук, ВИЭСХ, Москва
НЕКЛЕПАЕВ Б. Н., профессор, МЭИ, Москва
ОГОНЬКОВ В. Г., канд. техн. наук, ВНИИЭИМ, Москва
ОКОРОКОВ В. Р., профессор, ЛГТУ, Ленинград
ОРЛОВ А. В., профессор, ЛВВИСУ, Ленинград
ОСТАПЕНКО Е. И., канд. техн. наук, ИЦ ВЭИ, Москва
ОНИЩЕНКО Г. Б., профессор, ВЗПИ, Москва
ОРЛОВ Е. Г., доктор техн. наук, Минэлектротехприбор, Москва
ПОДАРУЕВ А. И., инж.-электрик, Минэлектротехприбор, Москва
ПОЗДЕЕВ А. Д., профессор, Чувашский Государственный университет, Чебоксары
РОЗАНОВ Ю. К., профессор, МЭИ, Москва
СОКОЛОВ Ю. А., канд. эконом. наук, ИХТИ, Москва
СТУМБРАС А. Ю., инж.-энергетик, Литовэнерго, Вильнюс
ТРУБАЧЕВ С. Г., канд. техн. наук, ВНИИЭИМ, Москва
ХОЛМСКИЙ Д. В., доктор техн. наук, Институт проблем энергосбережения, Киев
ЧУЧАЛИН А. И., канд. техн. наук, Томский политехнический институт, Томск
ШАХПАРУНЯНЦ Г. Р., канд. техн. наук, ВНИСИ, Москва
ШИЙКО А. П., инж.-электрик, ЛО «Сельэнергопроект», Ленинград
ФОТИН В. П., профессор, ВЭИ, Москва

Президиум ЦП ВНТОЭ

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., Митюшкин К. Г., Михайлов О. П., Морозкин 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.

Адреса редакции: 103012 Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 924-24-80

101000 Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648

Адрес для телеграмм: МОСКВА, 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Редакторы по направлениям тематики:

Евсеев Б. Н. (электрические машины, электропривод, электрический транспорт); Макашкин Б. Д. (ТОЭ, преобразовательная техника, электроматериалы); Прилуцкий А. Л. (электроэнергетика, ТВН, электрические аппараты)

Художественный редактор Т. А. Дворецкова Технический редактор Г. В. Преображенская Корректор И. А. Володьева

Сдано в набор 07.08.91. Подписано в печать 04.09.91. Формат 60×88¹/₈. Бумага кн.-журн. офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,78. Усл. кр.-отт. 11,27. Уч.-изд. л. 11,44. Тираж 3488 экз. Заказ 6120. Цена 2 р.

Энергоатомиздат, 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Трудового Красного Знамени
Чеховский полиграфический комбинат
Государственной ассоциации предприятий, объединений и организаций
полиграфической промышленности «АСПОЛ»
142300, г. Чехов Московской области

Отпечатано в Подольском филиале ПО «Периодика» Государственного комитета СССР по печати 142110, Подольск, ул. Кирова д. 25

СОДЕРЖАНИЕ

Дьяков А. В., Мамиконянц Л. Г., Савваитов Д. С. Сессия Международной конференции по большим электрическим системам высокого напряжения	1
Кощеев Л. А., Окин А. А., Мошкин Е. А. Адаптивная централизованная система противоаварийной автоматики	10
Чесаченко В. Ф., Малышев А. В. Математическая модель передачи постоянного тока для расчета электромеханических переходных процессов	16
Кесельман Л. М. Проблемы надежности и механики воздушных линий электропередачи	23
Зуев Э. Н., Федин В. Т. О классификации и терминологии в области воздушных линий электропередачи новых типов	29
Михайлов В. М. Функции Грина и интегральные уравнения плоскомеридианных полей устройств с длинными цилиндрами	38
Острейко В. Н. Аналитические методы расчета электромагнитных полей в многослойных средах	43
Колев Л. В. Достаточное условие единственности стационарного режима для одного класса нелинейных электрических цепей	47
Канискин В. А. Влияние электрического поля на процесс увлажнения электрической изоляции	52
СООБЩЕНИЯ	
Шуин В. А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6—10 кВ	58
Жуков В. В., Георгиади В. Х., Меджахед А. Расчет токов коротких замыканий синхронных генераторов автономных систем электропитания 6—10 кВ	61
Слодарж М. И. Об учете тока короткого замыкания от синхронных электродвигателей	65
Борисов М. Ф., Зобов Е. А., Литвинова И. Г. Продольная неоднородность свечения сильноточного искрового канала	66
Захаров В. А. О коэффициентах намагничивания и размагничивания ферромагнитных тел	68
Судов Н. Л., Шпицберг В. Е. Об интегральных уравнениях электродинамики в задаче рассеяния Н-поляризованного поля на цилиндрической оболочке	72
Коломейцева М. Б., Чугуев И. В. Получение оптимального температурного распределения в раскатываемых кольцах с помощью индукционного подогрева	74
ДИСКУССИИ	
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
ХРОНИКА	

CONTENTS

Dyakov A. V., Mamikonians L. G., Savvaitov D. S.— The Session of the International Conference of Large HV Power Systems (CIGRE)	14
Koscheyev L. A., Okin A. A., Moshkin E. A.— An Adaptive Centralized Emergency Automation System	10
Chesachenko V. F., Malyshev A. V.— A Mathematical Model for Calculating Electromechanical Transients in a DC Transmission System	16
Keselman L. M.— Problems of Reliability and the Mechanics of Overhead Transmission Systems	23
Zuyev E. N., Fedin V. T.— On the Classification and Terms Used in the Field of New Types of Overhead Transmission Lines	29
Mikhailov V. M.— Green's Functions and the Integral Equations of the Meridian Plane Fields of Devices With Long Cylinders	38
Ostreiko V. N.— Analytical Methods for Calculating Electromagnetic Fields in Multi-Layer Media	43
Kolev L. V.— The Sufficient Condition for Singularity of Stationary Operating Conditions for One Class of Non-Linear Electric Circuits	47
Kaniskin V. A.— How the Electric Field Influences the Process of Humidification of Electrical Insulation	52
REPORTS	
Shuin V. A.— Initial Phase Relationships in Electrical Transients for Ground Faults in 6—10 kV Cable Networks	58
Zhukov V. V., Georgiadi V. H., Medzhakhed A.— Calculation of Fault Currents in Synchronous Generators of Independent 6—10 kV Power Supply Systems	61
Slodarz M. I.— On Accounting for the Fault Current From Synchronous Motors	65
Borisov M. F., Zobov E. A., Litvinova I. G.— Lateral Non-Uniformity in the Glow of a High-Power Spark Channel	66
Zakharov V. A.— On Magnetization Coefficients and the Demagnetization of Ferromagnetic Bodies	68
Sudov N. L., Shpitsberg V. E.— On Integral Equations for Electrodynamics in the Problem of n-Polarized Field Scattering on a Cylindrical Shell	72
Kolomeitseva M. B., Chuguyev I. V.— Obtaining an Optimum Temperature Distribution in Expanding Rings Using Induction Heating	74
DISCUSSION	
FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING	
CHRONICLE	

